



**RICARDO JORGE  
ROMANO TEIXEIRA  
CUNHA**

**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR  
COESIVO E MISTO**





**RICARDO JORGE  
ROMANO TEIXEIRA  
CUNHA**

**AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR  
COESIVO E MISTO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





Dedico este trabalho à Daniela por todo apoio, estímulo, compreensão e amor que tem contribuído para a minha felicidade e consequentemente para a realização deste trabalho.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Luís Ivens Ferraz Saavedra Portela**  
investigador auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Esta secção destina-se a agradecer a todos os que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos meus pais, pois deram-me a oportunidade de ter a melhor formação possível como estudante e como pessoa. À minha irmã e à minha avó pelo apoio e incentivo, sempre que necessário.

A todos os meus amigos, em especial ao Nuno e ao Daniel, que estiveram sempre presentes nesta fase da minha vida e que foram muito importantes para mim.

À engenheira Maria Carlos e ao Técnico Vítor Rodrigues que se mostraram sempre disponíveis e prestáveis na realização dos ensaios.

Ao meu orientador, professor Carlos Coelho, por todo o apoio e disponibilidade, pela paciência com as minuciosas correções, e pelas inúmeras sugestões que contribuíram de forma positiva para levar a bom porto este trabalho. À engenheira Sandra Costa, por toda a disponibilidade demonstrada, pelas sugestões e por todo o incentivo. Gostaria de agradecer aos dois, principalmente, pela amizade demonstrada e pela constante partilha de conhecimentos que enriqueceram a minha formação.

A todos os mencionados e aqueles que não mencionei a minha sincera gratidão.

OBRIGADO!



**palavras-chave**

transporte sedimentar, sedimentos coesivos, sedimentos mistos, canal de hidráulica, taxas de erosão

**resumo**

A dissertação apresentada pretende contribuir para o conhecimento do transporte dos sedimentos coesivos e mistos. A análise dos processos que envolvem o transporte sedimentar deste tipo de sedimentos é complexa e de difícil avaliação, pois estão associados inúmeros fatores que condicionam o seu comportamento. Um conhecimento mais aprofundado do seu transporte sedimentar, leva a que as questões inerentes aos estuários sejam antecipadas e possam assim ser tomadas as devidas precauções.

A avaliação do comportamento dos sedimentos coesivos assentou em ensaios laboratoriais efetuados no canal de hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Nestes ensaios fez-se variar o tipo de sedimentos (amostras naturais e tratadas laboratorialmente), as condições hidrodinâmicas e a duração do período de análise. Para cada ensaio foram avaliados os volumes erodidos da secção teste, tendo-se verificado que as amostras tratadas apresentam maiores volumes de erosão comparativamente às naturais. Quanto à duração do ensaio verificou-se que para ambos os tipos de amostras, o aumento do tempo do ensaio conduz a maiores volumes de erosão, sendo esse aumento superior no caso das amostras naturais.

Para avaliar o impacto da composição granulométrica, foi adicionada areia às amostras recolhidas, tendo-se verificado que a presença de uma maior percentagem de areia conduz a maiores volumes de erosão.





**keywords**

Sediment transport, cohesive sediments, mixed sediments, hydraulic flume, erosion rate

**abstract**

The presented thesis intends to contribute to a better knowledge regarding cohesive and mixed sediment transport. The behavior of this type of sediment is complex and difficult to assess, given the fact that there are several factors conditioning their behavior. A better knowledge of their transport allows anticipating inherent questions to estuaries and taking precautionary measures.

The cohesive sediment behavior evaluation was based on laboratory tests performed in a hydraulic flume at the Civil Engineering Department of the University of Aveiro. These tests were conducted modifying the type of sediment (natural and laboratory treated samples), hydrodynamic conditions and the test duration. The eroded volume of the test section for each test was determined, and has been verified that treated samples present a higher erosion volume when compared to natural samples. Concerning the duration of the test, it has been verified that, for both samples, the period increase leads to higher eroded volumes, particularly in the case of natural samples.

Regarding the evaluation of the impact of granulometric composition, by the addition of sand to the natural samples, it was verified that the increase of the sand percentage leads to an increase in erosion volume.







## Índice

|   |            |
|---|------------|
| <b>Índice.....</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Simbologia .....</b>                                       | <b>III</b> |
| <b>Índice de Figuras .....</b>                                | <b>V</b>   |
| <b>Índice de Tabelas .....</b>                                | <b>VII</b> |
| <b>I. Introdução .....</b>                                    | <b>1</b>   |
| 1. Enquadramento.....   | 2          |
| 2. Objetivos e Metodologia .....                              | 2          |
| 3. Organização da Tese .....                                  | 2          |
| <b>II. Processos e Formulações .....</b>                      | <b>5</b>   |
| 1. Processos de Erosão/Deposição de Sedimentos Coesivos ..... | 6          |
| 1.1. Floculação .....   | 7          |
| 1.2. Deposição/Sedimentação .....                             | 7          |
| 1.3. Consolidação .....                                       | 7          |
| 1.4. Erosão.....  | 8          |
| 2. Formulações Numéricas.....                                 | 9          |
| 2.1. Deposição.....   | 9          |
| 2.2. Erosão.....  | 10         |
| 2.3. Tensão de Arrastamento.....                              | 11         |
| 2.4. Taxas de Deposição e Erosão.....                         | 13         |
| <b>III. Condições Laboratoriais .....</b>                     | <b>17</b>  |
| 1. Introdução.....  | 18         |
| 1.1. Sedimentos Coesivos.....                                 | 18         |
| 1.2. Misturas (coesivo-não coesivo).....                      | 19         |
| 2. Canal Hidráulico .....                                     | 24         |
| 2.1. Caracterização do Canal.....                             | 24         |
| 2.2. Secção de Teste .....                                    | 25         |
| 3. Caracterização dos Sedimentos .....                        | 26         |
| 3.1. Amostras Naturais .....                                  | 27         |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2. Amostras Tratadas.....                   | 30        |
| 3.3. Misturas com Areia.....                  | 31        |
| 4. Metodologias de Avaliação de Volumes ..... | 31        |
| <b>IV. Ensaios.....</b>                       | <b>35</b> |
| 1. Ensaios Preliminares .....                 | 36        |
| 1.1. Tempo de Ensaio.....                     | 36        |
| 1.2. Análise do Volume Erodido.....           | 37        |
| 1.3. Análise Visual.....                      | 39        |
| 2. Cenários Testados .....                    | 40        |
| 2.1. Amostras Naturais e Tratadas .....       | 40        |
| 2.2. Longa Duração.....                       | 47        |
| 2.3. Misturas com Areia.....                  | 48        |
| 3. Análise Numérica.....                      | 50        |
| <b>V. Considerações Finais .....</b>          | <b>57</b> |
| 1. Síntese de Resultados e Discussão.....     | 58        |
| 2. Conclusões .....                           | 59        |
| 3. Desenvolvimentos Futuros.....              | 60        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>       | <b>63</b> |

## Simbologia

|                  |  |
|------------------|--|
| $\tau_{d,total}$ | tensão crítica de deposição total                                |
| $\tau_{ce}$      | tensão crítica de erosão   |
| $a_{se}$         | coeficiente utilizado na fórmula de Hwang e Mehta                |
| $b_{se}$         | coeficiente utilizado na fórmula de Hwang e Mehta                |
| $c_{se}$         | coeficiente utilizado na fórmula de Hwang e Mehta                |
| $\rho_l$         | coeficiente utilizado na fórmula de Hwang e Mehta                |
| $\rho_m$         | massa volúmica húmida  |
| $\tau_{ef}$      | tensão crítica para a erosão de um fundo depositado recentemente |
| $A$              | constante utilizada na fórmula de Nicholson e O'Connor           |
| $B$              | constante utilizada na fórmula de Nicholson e O'Connor           |
| $\rho_b$         | massa volúmica seca  |
| $j$              | parâmetro usado na equação de Van Rijn                           |
| $k$              | parâmetro usado na equação de Van Rijn                           |
| $A_l$            | coeficiente que depende do tipo de lama                          |
| $E_l$            | coeficiente que depende do tipo de lama                          |
| $\tau$           | tensão de arrastamento   |
| $\rho_w$         | densidade da água  |
| $u_*$            | velocidade de atrito   |
| $f$              | colebrook  |
| $U$              | velocidade média   |
| $z$              | altura acima do fundo  |
| $h$              | profundidade   |
| $g$              | aceleração da gravidade  |
| $V$              | velocidade ao longo da altura do escoamento                      |
| $C$              | coeficiente de Chézy   |
| $U_b$            | componente horizontal da velocidade orbital de onda              |
| $f_w$            | fator adimensional de atrito da onda                             |
| $Q_d$            | taxa de sedimentação   |
| $C_s$            | concentração da matéria particulada                              |

|             |  |
|-------------|--|
| $w_s$       | velocidade de queda  |
| $P_d$       | probabilidade e deposição                                      |
| $Q_{se}$    | taxa de erosão   |
| $M_{se}$    | coeficiente de erosão  |
| $k$         | coeficiente de erodibilidade                                   |
| $\rho_b$    | densidade do líquido   |
| $m_k$       | massa da amostra de solo com as características <i>in situ</i> |
| $m_s$       | massa da amostra após secagem na estufa                        |
| $m_w$       | massa da água  |
| $W$         | teor em água   |
| $W_{médio}$ | teor em água médio   |
| $m_A$       | massa da amostra suspensa                                      |
| $m_P$       | massa da amostra envolvida com parafina                        |
| $m_I$       | massa da amostra parafinada imersa em água                     |
| $\gamma$    | peso volúmico  |
| $\gamma_w$  | peso volúmico da água  |
| $\gamma_P$  | peso volúmico da parafina                                      |
| $\gamma_d$  | peso volúmico seco   |
| $p_1$       | método de reposição de material                                |
| $p_2$       | método de determinação de cotas                                |
| $Q_l$       | caudal líquido   |



## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura II.1 – Ciclo de deposição de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005).....   | 6  |
| Figura II.2 – Interligação entre as propriedades dos sedimentos e os processos que afetam a erodibilidade (adaptado de Grabowski <i>et al.</i> , 2011) ..... | 8  |
| Figura II.3 – Esquema representativo das tensões críticas num escoamento .....   | 9  |
| Figura III.1 – Esquema dos equipamentos e respetivas localizações, nos ensaios de El Ganaoui <i>et al.</i> (2004).....                                       | 20 |
| Figura III.2 – Representação esquemática do canal com a direção do fluxo indicada na figura (Jacobs, <i>et al.</i> , 2011).....                              | 21 |
| Figura III.3 – Padrões de erosão observados nos ensaios de Jacobs, <i>et al.</i> (2011) .....  | 22 |
| Figura III.4 – Canal anular, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portela e Reis, 2001) .....   | 23 |
| Figura III.5 – Comportamento das amostras em função da tensão de arrastamento (Portela e Reis, 2011) .....   | 24 |
| Figura III.6 – Canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro .....  | 25 |
| Figura III.7 – Vista lateral da secção de teste.....   | 26 |
| Figura III.8 – Construção da secção de teste para realizar a bacia de sedimentos .....   | 26 |
| Figura III.9 – Local de recolha das amostras de sedimentos.....  | 27 |
| Figura III.10 – Amostras de solo envolvido na parafina .....   | 28 |
| Figura III.11 – Curva granulométrica do solo recolhido .....   | 29 |
| Figura III.12 – Material retido no peneiro 1/2’’ .....   | 30 |
| Figura III.13 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas com areia .....  | 30 |
| Figura III.14 – Posição dos elementos de medição de cotas designados por marcadores (em centímetros).....  | 31 |
| Figura III.15 – Colocação das amostras na secção de teste.....   | 32 |
| Figura III.16 – Colocação dos marcadores de madeira .....  | 32 |
| Figura IV.1 – Volume erodido em função da duração do ensaio (metodologia p <sub>1</sub> ) .....  | 37 |
| Figura IV.2 – Designação dos marcadores .....  | 38 |
| Figura IV.3 – Registo visual do comportamento das amostras para as condições do escoamento.....  | 39 |
| Figura IV.4 – Ensaios realizados sobre amostras no estado natural.....   | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Figura IV.5 – Ensaaios realizados sobre amostras tratadas .....  | 43 |
| Figura IV.6 – Comparação de volumes erodidos para os dois tipos de amostra.....                            | 44 |
| Figura IV.7 – Perfis longitudinais do escoamento .....   | 45 |
| Figura IV.8 – Registo fotográfico da erosão ocorrida para amostras e velocidades<br>diferentes.....        | 46 |
| Figura IV.9 – Registo fotográfico da erosão ocorrida nos ensaios longos.....                               | 47 |
| Figura IV.10 – Volume erodido em função da duração do ensaio e do tipo de amostra ....                     | 48 |
| Figura IV.11 – Registo fotográficos da areia utilizada nos ensaios .....                                   | 49 |
| Figura IV.12 – Volume de erosão em função da % de areia e da velocidade do escoamento<br>de 0,842 m/s..... | 50 |
| Figura IV.13 – Resultados do ensaio para uma mistura com 100% de areia .....                               | 50 |
| Figura IV.14 – Valores que caracterizam o escoamento.....  | 52 |
| Figura IV.15 – Taxa de erosão ( $Q_{se}$ ) em função da tensão de arrastamento .....                       | 54 |

## Índice de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela II.1 – Compilação bibliográfica de valores estimados para a tensão crítica de deposição total .....   | 10 |
| Tabela II.2 – Formulações para a estimativa da tensão crítica de erosão .....  | 10 |
| Tabela II.3 – Compilação bibliográfica de valores estimados para a tensão crítica de erosão .....  | 11 |
| Tabela II.4 – Formulações para estimativa da tensão de arrastamento .....  | 12 |
| Tabela II.5 – Formulações para estimativa da velocidade de atrito no fundo .....   | 12 |
| Tabela II.6 – Valores típicos da velocidade de queda em alguns estuários e baías (Shi <i>et al.</i> , 2003; Costa e Coelho, 2011).....                             | 14 |
| Tabela II.7 – Formulações para estimativa da taxa de erosão .....  | 14 |
| Tabela II.8 – Fórmulas para o cálculo da taxa superficial de erosão.....   | 15 |
| Tabela III.1 – Características do canal e da amostra .....   | 18 |
| Tabela III.2 – Características do canal e das amostras dos ensaios de El Ganaoui <i>et al.</i> (2004).....   | 20 |
| Tabela III.3 – Resumo do procedimento adotado em função da amostra .....   | 21 |
| Tabela III.4 – Características do canal e da amostra .....   | 22 |
| Tabela III.5 – Características do canal anular do LNEC .....   | 23 |
| Tabela III.6 – Caudais adotados durante os ensaios .....   | 25 |
| Tabela III.7 – Teor em água das amostras analisadas em laboratório .....   | 27 |
| Tabela III.8 – Pesos volúmicos das amostras analisadas em laboratório .....  | 29 |
| Tabela IV.1 – Resultado do volume erodido ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) em função da duração do ensaio (metodologia p <sub>1</sub> ).....                       | 36 |
| Tabela IV.2 – Profundidades de erosão registadas nos marcadores (mm).....  | 38 |
| Tabela IV.3 – Resultado dos volumes obtidos pelos dois processos de quantificação dos volumes .....  | 39 |
| Tabela IV.4 – Resultados dos ensaios sobre amostras no estado natural e tratadas.....  | 41 |
| Tabela IV.5 – Projeção dos volumes de erosão ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) em 480 minutos, com base na taxa de erosão registada nos ensaios de 15 minutos ..... | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela IV.6 – Estimativa da velocidade de atrito no fundo e da tensão de arrastamento com recurso a formulações ..... | 51 |
| Tabela IV.7 – Tensões críticas de erosão (Pa) .....   | 55 |

---

## I. Introdução

---

## **1. Enquadramento**

O conhecimento da hidrodinâmica dos estuários e da respetiva relação com o transporte sedimentar, permite avaliar a possibilidade de ocorrer assoreamento e consequente necessidade de dragagem, se existe o perigo de existência de fundões, instabilidade de margens ou perigo de danos em estruturas. Os solos dos leitos que estão normalmente associados aos estuários são do tipo coesivos ou mistos (coesivos e não coesivos). Estes sedimentos podem ser transportados pelo escoamento, sendo esses processos complexos e de difícil quantificação. Para se estudarem os processos recorrem-se a modelos físicos, através dos quais, é possível conhecer as propriedades das camadas de sedimentos, como por exemplo a tensão crítica de erosão, a taxa de erosão, a tensão crítica de deposição e a velocidade de sedimentação (El Ganaoui *et al.*, 2004).

## **2. Objetivos e Metodologia**

A dissertação apresentada tem como principal objetivo fazer uma caracterização do transporte dos sedimentos coesivos e mistos, permitindo adquirir um conhecimento mais profundo do comportamento deste tipo de sedimento.

De forma a atingir o objetivo proposto começou-se por estudar os processos associados ao transporte de sedimentos coesivos, tendo também sido feita uma recolha bibliográfica de alguns valores e formulações que caracterizassem estes processos.

Principalmente com o objetivo de avaliar os processos de erosão e os volumes de sedimentos transportados foram definidos ensaios laboratoriais a realizar no canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Os ensaios realizados permitiram avaliar as taxas de erosão, variando os tipos de amostra e as condições do ensaio (velocidade do escoamento e tempo de duração).

Com este volume de ensaios foi possível estabelecer relações entre os ensaios, ou comparar os valores obtidos com os valores já publicados.

## **3. Organização da Tese**

A dissertação apresentada está organizada em capítulos, ao longo dos quais são descritos todos os ensaios desenvolvidos e as conclusões obtidas. O presente capítulo faz um enquadramento geral do tema, apresenta os objetivos e traça as metodologias usadas para os alcançar.

O capítulo II foi dividido em dois subcapítulos, em que o primeiro subcapítulo descreve os processos associados ao transporte de sedimentos coesivos, e o segundo, apresenta alguns valores e formulações que permitem alcançar parâmetros importantes no transporte sedimentar, como a tensão crítica de erosão, a tensão de arrastamento e a taxa de erosão.

O capítulo III apresenta uma recolha bibliográfica de ensaios similares realizados por outros autores, descreve os procedimentos usados na caracterização dos sedimentos, e os preparativos necessários à realização dos ensaios. Por fim são apresentadas as metodologias adotadas na análise dos ensaios realizados.

No capítulo IV são apresentados, um conjunto de ensaios preliminares que permitiram tomar decisões acerca da duração e do método de avaliação dos ensaios. De seguida são exibidos os resultados dos diferentes ensaios realizados e é feita uma breve comparação entre o comportamento dos diversos cenários estudados. No final é exibida uma análise numérica com base nas formulações apresentadas pela bibliografia recolhida.

O último capítulo inicia-se com uma síntese de resultados e respetiva discussão. São analisados os valores obtidos nos ensaios e comparados com ensaios apresentados na bibliografia, estabelecendo assim comparações dos valores das propriedades dos sedimentos. De seguida é apresentado um subcapítulo em que se descrevem as principais conclusões a reter desta dissertação. Para finalizar são feitas sugestões para futuros estudos no tema abordado.





---

## **II. Processos e Formulações**

---

## 1. Processos de Erosão/Deposição de Sedimentos Coesivos

Os sedimentos coesivos presentes nas lagunas e em estuários, são compostos por frações de minerais inorgânicos, materiais orgânicos e bioquímicos. Os minerais presentes são do tipo argiloso e do tipo não argiloso, sendo que, os materiais com uma composição argilosa são os que predominam (Alves, 2009). No seu estado natural, os sedimentos têm diferentes composições, pelo que, a dificuldade de caracterização dos sedimentos é bastante elevada (Mitchener e Torfs, 1996). Em termos granulométricos, a fronteira entre os materiais coesivos e não coesivos é indefinida, mas em geral considera-se que sedimentos com diâmetros inferiores a 63  $\mu\text{m}$ , são coesivos.

Os sedimentos não coesivos movimentam-se individualmente sob a ação hidrodinâmica do escoamento e do seu peso próprio (Quintela, 2009). Pelo contrário, no caso dos sedimentos coesivos, o transporte não pode ser determinado em função da tensão de arrastamento e dimensão das partículas, pois os sedimentos coesivos apresentam mecanismos específicos que são determinantes no seu comportamento.

Num estuário ou lagoa os processos associados ao transporte dos sedimentos coesivos ocorrem de forma cíclica (floculação, deposição/sedimentação, consolidação, erosão). De seguida serão explicados cada um destes fenómenos de forma sucinta (Figura II.1).

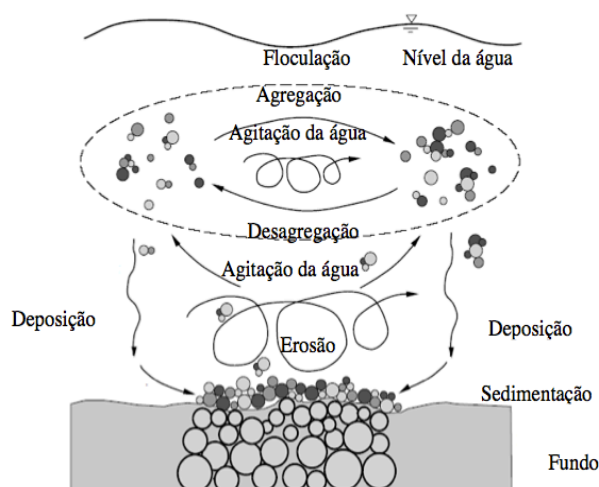


Figura II.1 – Ciclo de deposição de sedimentos coesivos (adaptado de Maggi, 2005)

### **1.1. Floculação**

A floculação traduz-se num processo de agregação e desagregação das várias partículas que se encontram em suspensão (Maggi, 2005). Os sedimentos coesivos tendem a ligar-se para formarem unidades maiores e menos densas, os flóculos. O flóculo pode assumir dimensões de várias ordens de grandeza superior, desde microns até milímetros. A massa específica é inferior à dos seus constituintes, pelo facto de existir a presença de água intersticial (Fernandes, 2001).

### **1.2. Deposição/Sedimentação**

A diferenciação entre a deposição e a sedimentação é complexa, pois podem ser confundidas, dado que a deposição é dada pelo mecanismo de queda da partícula enquanto que a sedimentação acontece quando a partícula entra em contacto com o fundo. A separação entre os processos para muitos autores nem existe sendo natural a sua discussão. A deposição de sedimentos coesivos depende das propriedades das partículas que os constituem (textura da superfície, densidade, forma, esfericidade, estrutura, tamanho e conteúdo orgânico), das propriedades do fluido (densidade, viscosidade e salinidade), dos níveis de turbulência do escoamento e da matéria particulada em suspensão (Costa e Coelho, 2011). O processo de deposição de sedimentos está relacionado diretamente com outros mecanismos como a floculação, consolidação e erosão, tornando o processo de deposição extremamente complexo (Oliveira, 2010).

### **1.3. Consolidação**

A consolidação é o processo que ocorre após a sedimentação. A consolidação segundo Huang *et al.* (2006) pode ser subdividida em dois tipos, consolidação primária e consolidação secundária. A primeira é causada pelo peso próprio das partículas, sendo que durante a deposição as partículas vão-se sobrepondo umas às outras, criando assim pressões nas partículas inferiores. A pressão criada leva à libertação da água que os flóculos contêm (Cancino e Neves, 1999). Este processo termina quando a pressão neutra é completamente dissipada, obrigando as partículas a ficarem unidas. A consolidação secundária inicia-se durante a consolidação primária e prolonga-se por semanas ou meses. Esta ocorre devido a uma sobrecarga constante que leva a uma deformação plástica do fundo (Alves, 2009).

#### 1.4. Erosão

A erosão dos solos coesivos é um mecanismo através do qual as partículas individuais ou agregadas são removidas. A erosão pode ser de dois tipos, a erosão em massa, correspondendo à erosão de grandes “massas” de solo e a erosão superficial, em que os sedimentos são erodidos partícula a partícula. O primeiro caso ocorre em locais com velocidades de escoamentos elevadas, enquanto o segundo tipo está presente para valores baixos da velocidade. Nos sedimentos coesivos, a erosão está diretamente dependente da estrutura física dos sedimentos e das interações existentes entre os seus componentes. A erosão é influenciada por três grupos de fatores: físicos, geoquímicos e biológicos (Figura II.2).

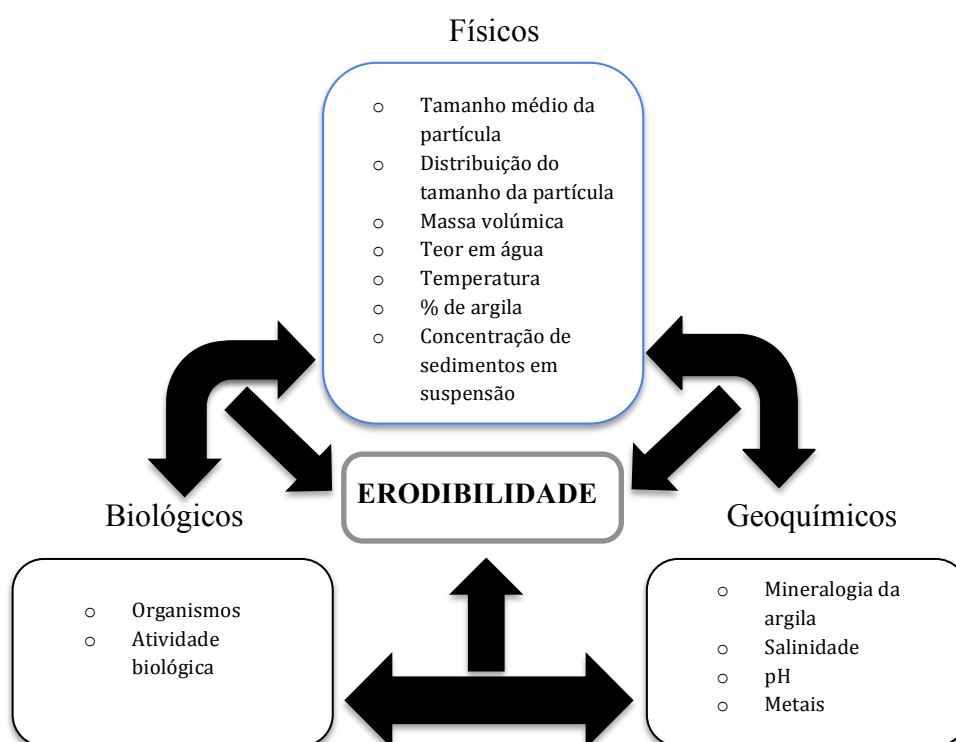


Figura II.2 – Interligação entre as propriedades dos sedimentos e os processos que afetam a erodibilidade (adaptado de Grabowski *et al.*, 2011)

Segundo Oliveira (2010) pode ocorrer erosão superficial de flóculos do fundo (quebras inter-partículas e ligações electromecânicas), erosão gravítica (ocorre uma falha geotécnica no fundo, levando a que os materiais acima dele fiquem suspensos no escoamento) e arrastamento de lama fluída (os sedimentos do fundo formam com a água uma mistura

fluída, o que destabiliza a interface sedimento-água e, em seguida, a lama fluída é arrastada do fundo).

## 2. Formulações Numéricas

Os processos descritos anteriormente podem ser traduzidos por formulações numéricas e comprovados por ensaios em laboratório ou *in situ*. São apresentadas de seguida formulações e valores publicados que quantificam em termos numéricos os processos descritos.

Durante o escoamento um sedimento coesivo pode passar por duas fases distintas, a deposição e a erosão. Cada uma das fases é caracterizada por dois tipos de tensão, uma tensão total e uma tensão parcial (Figura II.3).

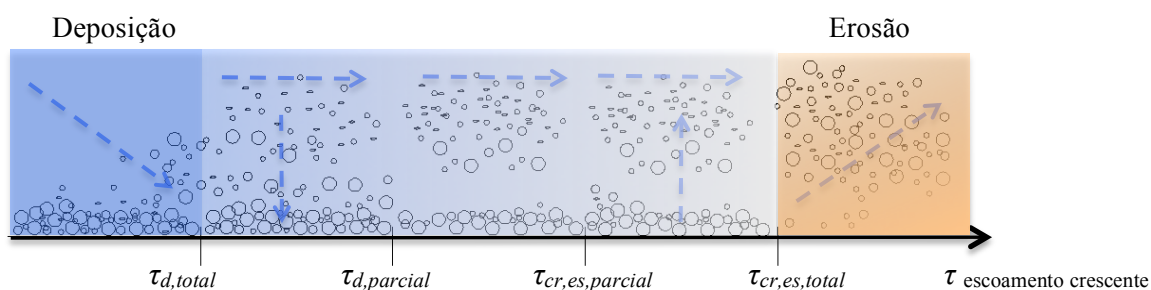


Figura II.3 – Esquema representativo das tensões críticas num escoamento

### 2.1. Deposição

A deposição de sedimentos coesivos pode ocorrer quando a tensão tangencial no fundo ( $\tau$ ) é inferior à tensão tangencial crítica de deposição total ( $\tau_{d,total}$ ). Desta forma, todas as partículas são depositadas.

Quando a tensão tangencial no fundo é superior à tensão tangencial crítica de deposição total, mas inferior à tensão tangencial crítica de deposição parcial, ocorre a deposição dos flóculos com ligações fortes, enquanto os flóculos com ligações fracas permanecem em suspensão (Oliveira, 2010). Os valores da tensão tangencial crítica de deposição total são determinados através de ensaios. Ao longo do tempo têm vindo a ser realizados ensaios em diferentes locais, caracterizando valores para esta tensão (Tabela II.1).

Tabela II.1 – Compilação bibliográfica de valores estimados para a tensão crítica de deposição total

| Referência                  | Concentração (g/l)       | $\tau_{d, total}$ (N/m <sup>2</sup> ) | Local                                    |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|
| Krone (1962)                | < 0,3                    | 0,06                                  | São Francisco, Estados Unidos da América |
| Krone (1962)                | $\geq 0,3$ e $\leq 10,0$ | 0,08                                  | São Francisco, Estados Unidos da América |
| Mehta e Partheniades (1973) |                          | 0,15                                  |  |
| Huang <i>et al.</i> (2006)  |                          | 0,06 a 1,1                            |  |
| Lopes e Dias (2007)         |                          | 0,1                                   | Ria de Aveiro                            |

## 2.2. Erosão

A erosão pode ser caracterizada por dois parâmetros, a tensão crítica para a erosão e a taxa de erosão.

Tabela II.2 – Formulações para a estimativa da tensão crítica de erosão

| Referência                  | Equação   | Parâmetros  |
|-----------------------------|---|---|
| Hwang e Mehta (1989)        | $\tau_{ce} = a_{se}(\rho_m - \rho_l)^{b_{se}} + c_{se}$ | $a_{se}=0,883$ ; $b_{se}=0,2$ ; $c_{se}=0,05$ ; $\rho_l=1,065$<br>$\tau_{ce}$ – tensão crítica de erosão superficial (N/m <sup>2</sup> )<br>$\rho_m$ – massa volúmica húmida (g/cm <sup>3</sup> )<br>$\tau_{ef}$ – tensão crítica para erosão de um fundo depositado recentemente |
| Nicholson e O'Connor (1986) | $\tau_{ce} = \tau_{ef} + A(\rho_b - \rho_f)^B$          | $\rho_b$ – massa volúmica seca do fundo<br>$\rho_f$ – massa volúmica seca do fundo recentemente depositado<br>A e B – constantes<br>$\tau_{ce}$ – tensão crítica de erosão superficial (N/m <sup>2</sup> )  |
| van Rijn (1993)             | $\tau_{ce} = j(\rho_b)^k$                               | $\rho_b$ – massa volúmica seca (g/l)<br>j e k – parâmetros determinados experimentalmente<br>k=2,3 (Brisbane River, Austrália; Estuário Grangemouth, Escócia; Belawan, Indonésia) e k=1,5 (Baia Cardiff, Inglaterra)  |
| Delo (1988)                 | $\tau_{ce} = A_l(\rho_b)^{E_l}$                         | $\tau_{ce}$ – tensão crítica de erosão<br>$\rho_b$ – massa volúmica seca<br>A <sub>l</sub> e E <sub>l</sub> – coef. dependem do tipo de lama  |

A tensão crítica para a erosão, representa a tensão crítica do escoamento a partir da qual ocorre erosão. A taxa de erosão refere-se à quantidade de sedimentos que a erosão reduz num intervalo de tempo (Araújo, 2004). Mehta (de acordo com Alves, 2009) referiu que a erosão varia com a magnitude da tensão tangencial no fundo, apresentando vários modos de erosão dos sedimentos coesivos. A erosão pode ser classificada como erosão superficial de flóculo do fundo, erosão gravítica e erosão por arrastamento de lama fluída. A tensão crítica de erosão pode ser calculada segundo as formulações apresentadas na Tabela II.2. Para além das formulações apresentadas, a tensão crítica de erosão pode ser obtida em ensaios experimentais ou em aproximações numéricas (Tabela II.3).

Tabela II.3 – Compilação bibliográfica de valores estimados para a tensão crítica de erosão

| Referência                 | Valores relativos à erosão | Observações   |
|----------------------------|----------------------------|---|
| <b>Cole e Miles (1983)</b> | 0,1-3,0 N/m <sup>2</sup>   | Intervalo de valores para a tensão crítica de erosão para as lamas de Brisbane, Austrália, dependendo do peso volúmico seco (0,07-0,40 ton/m <sup>3</sup> ) |
| <b>Lopes e Dias (2007)</b> | 0,2 N/m <sup>2</sup>       | Ria de Aveiro   |

### 2.3. Tensão de Arrastamento

A tensão de arrastamento é estimada através das equações apresentadas na Tabela II.4. Mediante o tipo de solo que esteja a ser ensaiado existe uma formulação mais adequada. Ravens e Sindelar (2008) apresentam uma formulação para solos coesivos, enquanto que Trento (2005) e Lesser *et al.* (2004) apresentam soluções para solos mistos. A fórmula apresentada por Trento (2005) para o cálculo da tensão de arrastamento, incorpora vários parâmetros, sendo que a velocidade de atrito assume particular importância, podendo ser determinada por várias formulações.

O cálculo da velocidade de atrito no fundo, segundo Costa e Coelho (2011), pode ser estimado por três formulações diferentes: Manning, von Karman-Prandtl e Chézy (Tabela II.5).

Tabela II.4 – Formulações para estimativa da tensão de arrastamento

| Referência                  | Fórmula  | Parâmetros  |
|-----------------------------|--|---|
| Ravens e Sindelar (2008)    | $\tau = \rho_w u_*^2$  | $\tau$ – tensão de arrastamento (Pa)                              |
|                             |  | $\rho_w$ – densidade da água (kg/m <sup>3</sup> )                 |
|                             |  | $u_*$ – velocidade de atrito (m/s)                                |
|                             |  | $\rho_w$ – densidade da água (kg/m <sup>3</sup> )                 |
| Trento (2005)               | $\tau = \rho_w \frac{f}{8} U^2$  | $U$ – velocidade média vertical (m/s)                             |
|                             |  | $f$ – colebrook   |
|                             |  | $\rho_w$ – densidade água (kg/m <sup>3</sup> )                    |
|                             |  | $u_*$ – velocidade de atrito (m/s)                                |
| Lesser <i>et al.</i> (2004) | $\tau = \frac{\rho_w g (V_x^2 + V_y^2)}{C^2} + \frac{1}{4} \rho_w f_w U_b^2$ | $z$ – altura acima do fundo (m)                                   |
|                             |  | $h$ – profundidade (m)  |
|                             |  | $\tau$ – tensão de arrastamento (Pa)                              |
|                             |  | $\rho_w$ – densidade da água (kg/m <sup>3</sup> )                 |
|                             |  | $g$ – aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )                 |
|                             |  | $V$ – velocidade ao longo da altura (m/s)                         |
|                             |  | $C$ – coeficiente de Chézy (m <sup>1/2</sup> /s)                  |
|                             |  | $U_b$ – componente horizontal da velocidade orbital da onda (m/s) |
|                             |  | $f_w$ – factor adimensional de atrito da onda                     |

Tabela II.5 – Formulações para estimativa da velocidade de atrito no fundo

| Denominação        | Fórmula  | Parâmetros   |
|--------------------|--|--|
| Manning            | $u_* = U \frac{ng^{1/2}}{h^{1/6}}$                             | $U$ – velocidade vertical média (m/s)              |
|                    |  | $n$ – rugosidade de Manning (m <sup>-1/3</sup> /s) |
|                    |  | $h$ – altura do escoamento (m)                     |
|                    |  | $g$ – aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )  |
| Von Karman-Prandtl | $\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right)$ | $U$ – velocidade vertical média (m/s)              |
|                    |  | $z$ – altura da partícula acima do fundo (m)       |
|                    |  | $z_0$ – rugosidade do fundo (m)                    |
|                    |  |  |
| Chézy              | $u_* = C \sqrt{hi}$  | $C$ – coeficiente de Chézy (m <sup>1/2</sup> /s)   |



## 2.4. Taxas de Deposição e Erosão

O cálculo da taxa de deposição total pode ser efectuado através da fórmula 1 apresentada por Krone (1962). A equação apresentada é composta por diversas variáveis, nomeadamente a concentração da matéria particulada em suspensão ( $C_s$ ), a velocidade de queda ( $w_s$ ) e a probabilidade de deposição ( $P_d$ ). A concentração da matéria particulada em suspensão pode ser determinada através de ensaios laboratoriais, ou através de ensaios realizados em campo. Os resultados dos ensaios realizados em campo podem variar em grande escala, dependendo do local.

$$Q_d = C_s w_s P_d \quad (1)$$

Segundo Krone (1962), a probabilidade de deposição ( $P_d$ ) é definida por:

$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,total}} \quad \tau \leq \tau_{d,total} \quad (2)$$

A probabilidade de deposição indica a probabilidade das partículas aderirem ao fundo e não voltarem a ser arrastadas pelo escoamento. Esta probabilidade é função da tensão de arrastamento e da tensão crítica de deposição total.

A velocidade de queda de uma partícula, é um parâmetro de extrema importância em várias temáticas relacionadas com a gestão das zonas costeiras, nomeadamente estudos ecológicos, obras de engenharia, qualidade da água e estimativa das taxas de erosão e deposição a curto e longo prazo. A velocidade de queda dos sedimentos coesivos depende das propriedades das partículas (textura da superfície, densidade, forma, esfericidade, estrutura, tamanho e conteúdo orgânico), das propriedades do fluido (densidade, viscosidade e salinidade), dos níveis de turbulência do escoamento e da matéria particulada em suspensão (Costa e Coelho, 2011). A Tabela II.6 apresenta alguns valores obtidos por diversos autores para esta variável.

Tabela II.6 – Valores típicos da velocidade de queda em alguns estuários e baías (Shi *et al.*, 2003; Costa e Coelho, 2011)

| Referência                      | Localização                          | Método                              | $w_s$ (mm/s) |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Van Leussen e Cornelisse (1993) | Estuário Sem, Holanda                | Tubo de deposição<br><i>in situ</i> | 0,56-2,82    |
| Ten Brinke (1994)               | Estuário Oosterschelde, Holanda      | Tubo de deposição<br><i>in situ</i> | $\leq 10,0$  |
| Valeur <i>et al.</i> (1996)     | Sound, Dinamarca e Suécia            | Retenção dos sedimentos             | 0,04         |
| Plus <i>et al.</i> (1998)       | Estuários Elbe e Weser, Alemanha     | Tubos Owen<br><i>in situ</i>        | 0,01-3,50    |
| Hill <i>et al.</i> (1998)       | Baía Glacier, Alasca, Estados Unidos | Tubo de deposição<br><i>in situ</i> | 2,21         |
| Hill <i>et al.</i> (2000)       | Estuário do Rio Eel, Estados Unidos  | <i>Fitting method</i>               | 0,06-0,10    |
| Van der Lee (2000)              | Estuário Dollard, Holanda            | Vídeo, <i>in situ</i>               | 2,70         |
| Shi <i>et al.</i> (2003)        | Estuário Changjiang, China           | Equação de Rouse                    | 0,4-4,1      |
| Lopes e Dias (2007)             | Ria de Aveiro, Portugal              | Equação de Dyer                     | 0,10-0,30    |
| Costa e Coelho (2011)           | Ria de Aveiro, Portugal              | Equação de Stokes                   | 0,03-0,06    |

Tabela II.7 – Formulações para estimativa da taxa de erosão

| Referência                              | Fórmula   | Parâmetros   |
|---|---|--|
| Partheniades (1964) e Ariathurai (1974) | $Q_{es} = \begin{cases} M_{se} \left( \frac{\tau - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right) & \tau \geq \tau_{ce} \\ 0, & \tau \leq \tau_{ce} \end{cases}$ | $\tau_{ce}$ – tensão crítica para a erosão (N/m <sup>2</sup> )<br>$\tau$ – tensão de arrastamento (N/m <sup>2</sup> )<br>$M_{se}$ – coeficiente de erosão (kg/m <sup>2</sup> /s) |
| Partheniades (1965)                     | $Q_{es} = M_{se} \left( \frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right), \quad \tau_b > \tau_{ce}$   | $M_{se}$ – coeficiente de erosão (kg/m <sup>2</sup> /s)<br>$\tau_{ce}$ – tensão crítica de erosão (Pa)   |
| Arulanandan (1980)                      | $Q_{es} = k(\tau - \tau_{ce})$  | $Q_{es}$ – taxa de erosão<br>$K$ – coeficiente de erodibilidade<br>$\tau$ – tensão de arrastamento<br>$\tau_{ce}$ – tensão crítica de erosão                                     |

A taxa de erosão superficial é dada pelas expressões apresentadas na Tabela II.7. A equação apresentada por Partheniades (1964) e Ariathurai (1974), para além de depender da tensão crítica para a erosão e da tensão de arrastamento, também depende de uma constante, designada por constante de erosão. Esta constante pode ser determinada através das formulações apresentadas na Tabela II.8.

Tabela II.8 – Fórmulas para o cálculo da taxa superficial de erosão

| Referência   | Fórmula  | Parâmetros  |
|--|--|---|
| <b>Hwang e Mehta (1989)</b>                        | $\log_{10} M_{se} = 0,23 e^{\left(\frac{0,198}{\rho_b - 1,0023}\right)}$ | $\rho_b$ – densidade do líquido (g/cm <sup>3</sup> )<br>$M_{se}$ – coeficiente de erosão (mg/cm <sup>2</sup> /hr) |
| <b>Teisson e Latteux (1986), e Cormault (1971)</b> | $M_{se} = 0,55 \left(\frac{\rho_b}{1000}\right)^3$                       | $\rho_b$ – densidade do líquido (g/l)<br>$M_{se}$ – coeficiente de erosão (kg/m <sup>2</sup> /s)                  |



---

### **III. Condições Laboratoriais**

---

## 1. Introdução

O uso de modelos numéricos que permitam a avaliação e compreensão da dinâmica de transporte dos sedimentos coesivos, assume uma importância cada vez maior. Através dos modelos consegue-se avaliar o comportamento de grandezas fundamentais, como por exemplo as taxas de erosão e deposição. No entanto, os ensaios laboratoriais e *in situ* assumem uma enorme importância, na medida em que permitem a avaliação e calibração de parâmetros que descrevam estas grandezas e a sua influência na avaliação do transporte sedimentar. Os ensaios laboratoriais mais utilizados podem ser do tipo tradicional (unidirecional) ou anular.

### 1.1. Sedimentos Coesivos

Foram identificados vários ensaios descritos na bibliografia, sendo dado destaque aos equipamentos usados, às velocidades, aos tipos de amostras e aos respectivos resultados.

Para tentar antecipar alguns dos aspetos mais relevantes da realização de ensaios em laboratório, avaliaram-se diversos estudos efetuados com sedimentos finos e com misturas. Em primeiro lugar será apresentado um ensaio realizado por Ravens e Sindelar (2008) com o recurso a amostras de sedimentos finos. Este ensaio consistiu na avaliação da taxa de erosão de sedimentos finos ( $7\ \mu\text{m}$ ) de quartzo, num canal unidirecional (Tabela III.1).

Tabela III.1 – Características do canal e da amostra

| Grandeza                           | Dimensão  |
|------------------------------------|---|
| Altura e largura do canal          | $10 \times 13\ \text{cm}^2$                         |
| Caudal do escoamento               | $0,006\ \text{m}^3/\text{s}$                        |
| Amostras ( $L_1$ , $L_2$ , $L_3$ ) | $110 \times 13\ \text{cm}^2$ ; 5 cm de profundidade |
| Amostras ( $L_4$ , $L_5$ )         | $15 \times 13\ \text{cm}^2$ ; 30 cm de profundidade |
| Diâmetro das partículas            | $7\ \mu\text{m}$                                    |

Os autores deste ensaio concluíram que para uma amostra de tamanho maior ( $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ ), a taxa de erosão foi menor, quando comparada com a taxa de erosão correspondente às amostras de tamanho menor ( $L_4$  e  $L_5$ ). Os valores registados para as taxas de erosão das amostras de maiores dimensões variaram de  $0,09\ \text{g/m}^2/\text{s}$  até  $0,42\ \text{g/m}^2/\text{s}$ , enquanto que para as amostras de menores dimensões as taxas de erosão variam de  $0,08\ \text{g/m}^2/\text{s}$  até

0,058 g/m<sup>2</sup>/s. Assim, as amostras de menores dimensões registaram cerca de 35 % mais erodibilidade.

### **1.2. Misturas (coesivo-não coesivo)**

Neste subcapítulo apresentam-se algumas considerações relativas a ensaios com sedimentos mistos e descrevem-se três ensaios com condições diferentes para o mesmo tipo de amostra.

Segundo o documento apresentado por Mitchener e Torfs (1996), a tensão crítica de erosão aumenta quando um material adesivo com resistência à erosão é adicionado à amostra. Em geral a resistência aumenta com a adição de finos, dependendo do tipo de material coesivo adicionado. Caso se adicione uma percentagem elevada de argila à mistura, esta comporta-se como se fosse só lama, ou seja, em locais em que a percentagem de areias é mínima, a modelação do estudo deve ser direccionado como se tratando apenas de uma camada de sedimentos coesivos. Numa camada com percentagens de 70% a 100% de areia a tensão de arrastamento depende do tamanho do grão da areia e das propriedades coesivas da argila. A adição de argila à areia, não só atrasa o início da erosão, aumentando as condições limite para o movimento de sedimentos, como também diminui as taxas de erosão.

Seguidamente apresentam-se três ensaios realizados com misturas, para diferentes condições de escoamento.

#### **▪ 1º Estudo, realizado por El Ganaoui *et al.* (2004)**

Este estudo teve como principal objetivo identificar, através de um ensaio, o comportamento de amostras recolhidas *in situ*, comparando os valores obtidos (tensão crítica de erosão e concentração de sedimentos em suspensão) com dados existentes de ensaios realizados com amostras controladas. A instalação laboratorial seguiu o esquema da Figura III.1. Para a realização deste estudo foram utilizadas várias camadas de sedimentos. A sua utilização permite distinguir duas camadas, uma camada superior de sedimentos mais soltos, caracterizada por uma tensão crítica baixa, e uma camada inferior bem compactada, com uma tensão crítica mais elevada. O canal adotado nos ensaios de El Ganaoui *et al.* (2004) tem as características descritas na Tabela III.2. Para medir a velocidade do escoamento foram utilizados dois dispositivos, um LDV (Laser Doppler Velocimeter) e um BSA (Burst Spectrum Analysers).

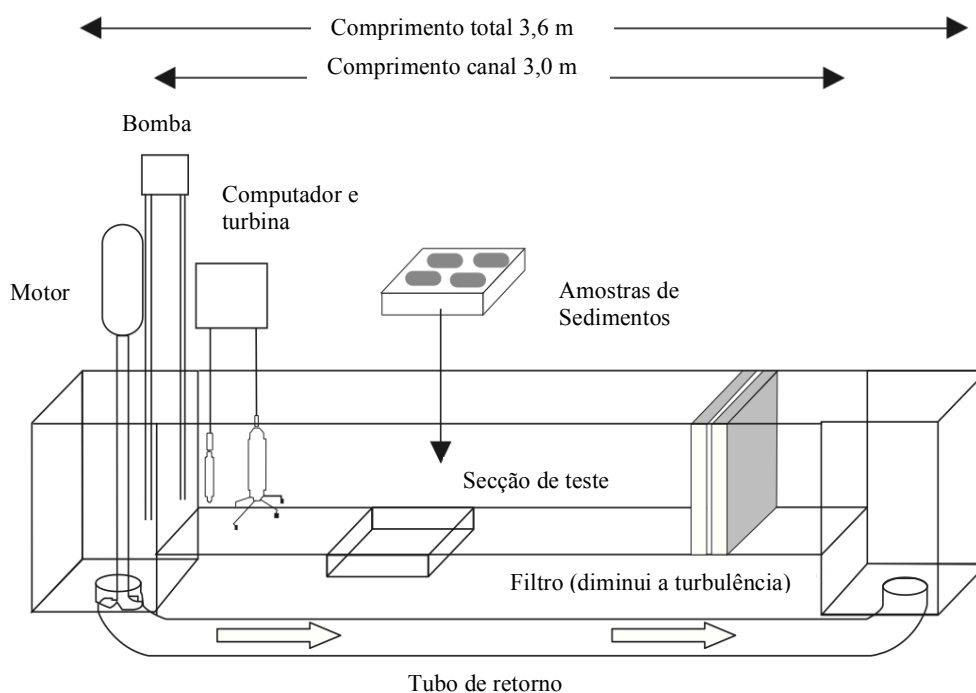


Figura III.1 – Esquema dos equipamentos e respectivas localizações, nos ensaios de El Ganaoui *et al.* (2004)

Tabela III.2 – Características do canal e das amostras dos ensaios de El Ganaoui *et al.* (2004)

| Grandeza                  | Valor                         |
|---------------------------|-------------------------------|
| Altura e largura do canal | 40 x 40 cm <sup>2</sup>       |
| Velocidade do escoamento  | 2,5 a 32 cm/s                 |
| Altura de água no canal   | 10 cm                         |
| Amostras                  | 4 amostras com forma circular |
| Tamanho das partículas    | 30 µm                         |

No ensaio, as amostras de sedimentos usadas provinham de ambientes marinhos e de ambientes doces (Tabela III.3).



Tabela III.3 – Resumo do procedimento adotado em função da amostra

| Amostra | Velocidade  | Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ ) | Observações   |
|---------|---|----------------------------------|---|
| 1       | Velocidade crescente com passos de 2,5 cm/s em intervalos de tempo de 8 minutos | $10 < \phi_{50} < 20$            | Velocidade máxima atingida de 32 cm/s, quando esta foi atingida a velocidade foi diminuída em passos idênticos até parar                                    |
| 2       | Velocidade crescente com passos de 2,5 cm/s em intervalos de tempo de 8 minutos | $40 < \phi_{50} < 70$            | Velocidade máxima atingida de 32 cm/s, mantendo-se o escoamento com esta velocidade durante 20 minutos. Atingido o tempo, a corrente foi parada bruscamente |
| 3       | Velocidade crescente com passos de 2,5 cm/s em intervalos de tempo de 8 minutos | $10 < \phi_{50} < 20$            | Velocidade máxima atingida de 32 cm/s, mantendo-se o escoamento com esta velocidade durante 3 horas. Atingido o tempo, a corrente foi parada bruscamente    |

▪ 2º Estudo, realizado por Jacobs *et al.* (2011)

Este estudo possibilitou a avaliação da erosão de argilas produzidas artificialmente. Para tal, foram realizados testes num canal rectangular de pequenas dimensões, com um fluxo unidirecional (Figura III.2).

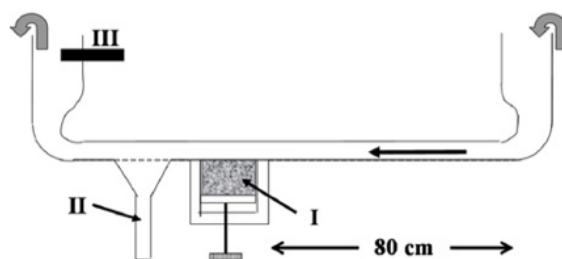


Figura III.2 – Representação esquemática do canal com a direção do fluxo indicada na figura (Jacobs, *et al.*, 2011)

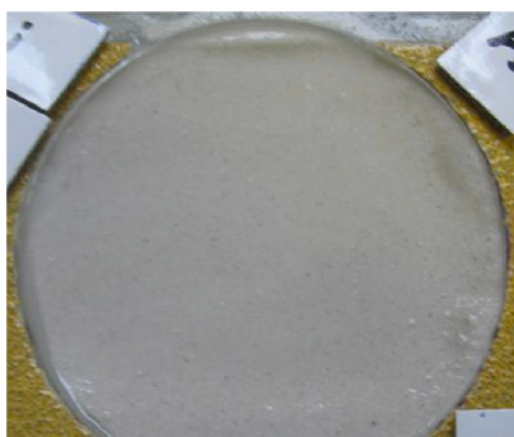
O ensaio permitiu avaliar a tensão crítica de erosão e a taxa de erosão, sendo que no ensaio foram variadas as condições de deslocamento. As partículas de areia, silte e argila foram

secas num forno e posteriormente misturadas manualmente e colocadas nos respetivos recipientes cilíndricos. As características do canal e das amostras são apresentadas na Tabela III.4. O diâmetro médio das partículas de areia foi de 170  $\mu\text{m}$ , e no caso do silte 28  $\mu\text{m}$ . Foram constituídos seis grupos de amostras. Os grupos de 1 a 4 tinham uma granulometria crescente e uma constituição variável. Os grupos 1 e 2 tinham uma mistura com base em argila e silte, os grupos 3 e 4 com base em areia e silte. O grupo 5 tinha uma composição semelhante ao grupo 1. O grupo 6 era constituído apenas por areia e silte. Foi incrementado outro fator diferenciador entre as misturas, pois nos conjuntos de 1 a 4 foram introduzidos minerais de argila, caulinita, mas no conjunto 5 foi introduzida bentonite.

Tabela III.4 – Características do canal e da amostra

| Grandeza                  | Dimensão                    |
|---------------------------|-----------------------------|
| Altura e largura do canal | 2 x 8 cm <sup>2</sup>       |
| Comprimento               | 1,2 m                       |
| Dimensões das amostras    | 9 cm diâmetro; 10 cm altura |

Durante o ensaio, foi visível que para tensões de escoamento mais elevadas, ocorreu uma erosão generalizada, sendo também possível identificar padrões irregulares de erosão (Figura III.3).



a) Erosão superficial



b) Erosão irregular

Figura III.3 – Padrões de erosão observados nos ensaios de Jacobs, *et al.* (2011)

▪ **3º Estudo, realizado por Portela e Reis (2001)**

Este estudo foi realizado com um tipo de canal diferente dos apresentados anteriormente, tendo tido a duração de 15 dias. Este canal tem uma forma anular (Figura III.4) e como tal, o escoamento é contínuo e pode ser mantido em funcionamento durante o tempo desejado. Neste ensaio os autores utilizaram amostras de sedimentos de estuários portugueses (Tejo, Sado e Guadiana). Após serem examinadas, concluiu-se que as amostras eram principalmente constituídas por quartzo (30% a 57%) e argila (16% a 27%). A percentagem de sedimento fino nas amostras varia de mais de 99% (Sado) a 58% (Guadiana) do total.



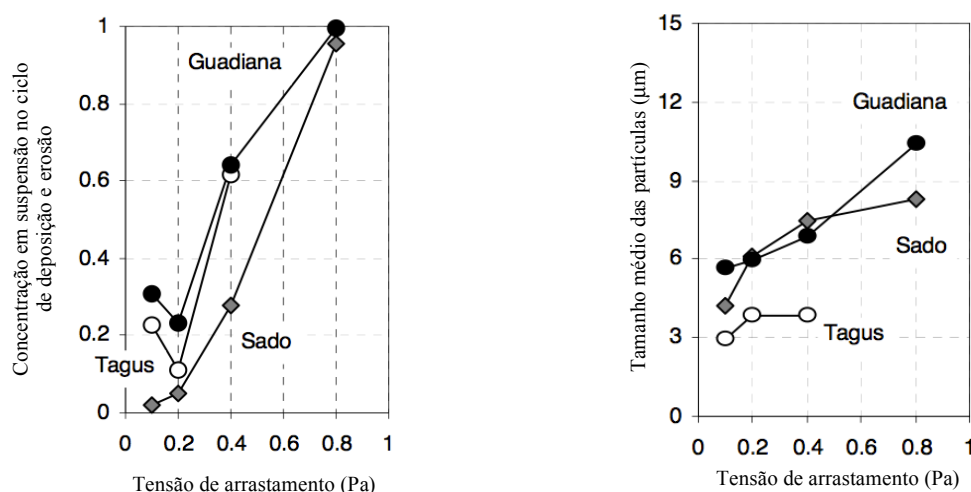
Figura III.4 – Canal anular, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portela e Reis, 2001)

Tabela III.5 – Características do canal anular do LNEC

| Grandeza                  | Dimensão                    |
|---------------------------|-----------------------------|
| Altura e largura do canal | 40 x 30 cm <sup>2</sup>     |
| Velocidade do escoamento  | 2,5 a 32 cm s <sup>-1</sup> |
| Diâmetro do canal         | 10 cm                       |

O ensaio iniciou-se com uma tensão de arrastamento de 0,8 Pa, sendo diminuída posteriormente em passos de 6 a 24 horas, até atingir o valor zero. A tensão manteve-se com o valor zero durante 4 dias, após os quais foi aumentada, em passos de 5 a 24 horas. Este processo é conveniente para concluir sobre a ocorrência de deposição ou erosão

parcial. Na desaceleração, as concentrações em suspensão têm uma tendência para estabilizar dentro de 24 horas, enquanto que na aceleração, as concentrações em suspensão têm uma tendência mais rápida para atingir o equilíbrio. Os resultados permitiram estabelecer dois tipos de relação (Figura III.5), concluindo-se que para concentrações mais elevadas a tensão de arrastamento está diretamente relacionada com o tamanho médio das partículas.



a) Concentrações dos sedimentos em suspensão      b) Tamanho médio das partículas em suspensão

Figura III.5 – Comportamento das amostras em função da tensão de arrastamento (Portela e Reis, 2011)

O estudo dos diferentes ensaios foi importante na medida em que, transmitiu informação acerca da execução dos ensaios e forneceu resultados que serão discutidos e comparados no último capítulo.

## 2. Canal Hidráulico

Com base na avaliação dos procedimentos de ensaios realizados com sedimentos coesivos e mistos, prepararam-se uma série de ensaios a realizar no canal hidráulico do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

### 2.1. Caracterização do Canal

O canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem um comprimento útil de 10 m, com secção transversal de  $0.40 \times 0.50 \text{ m}^2$  (Figura III.6). O

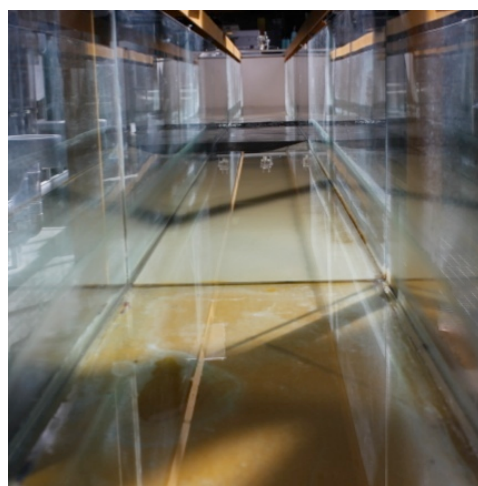
canal permite adotar diferentes inclinações, através de um apoio ajustável em altura e de um apoio fixo. Assim, é possível alterar a inclinação deste entre os limites de -0.875 % e de +2.625 % (Ribeiro, 2009).

A alimentação do canal é efetuada por um sistema de bombagem que permite a circulação de água em circuito fechado. Existem reservatórios laterais que possibilitam armazenar água suficiente para garantir que não há falha no circuito hidráulico.

Consoante a posição de funcionamento da bomba e a inclinação do canal, é possível obter sete caudais diferentes e vinte e uma velocidades de escoamento distintas (Tabela III.6).



a) Vista geral do canal



b) Vista da secção transversal

Figura III.6 – Canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Tabela III.6 – Caudais, inclinações e velocidades adotadas durante os ensaios

| Caudal (l/s)     |        | 8,3   | 10,4  | 12,5  | 14,3  | 16,2  | 18,2  | 20,1  |
|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Velocidade (m/s) | i=0,5% | 0,463 | 0,510 | 0,551 | 0,569 | 0,598 | 0,639 | 0,667 |
|                  | i=1,0% | 0,492 | 0,541 | 0,591 | 0,629 | 0,620 | 0,673 | 0,706 |
|                  | i=1,5% | 0,677 | 0,675 | 0,731 | 0,797 | 0,781 | 0,801 | 0,842 |

## 2.2. Secção de Teste

Para a realização dos ensaios foi criada uma secção de teste (bacia de sedimentos) do mesmo modo que o estudo de El Ganaoui *et al.* (2004), com as dimensões de  $40 \times 40 \times 5 \text{ cm}^3$ , onde foram colocadas as amostras de sedimentos. A secção teste

compreende ainda um segmento de aproximação a montante, com um comprimento total de 170 cm, e uma zona a jusante, de 80 cm de comprimento, que faz a transição entre a secção teste e o extremo do canal (Figura III.7).

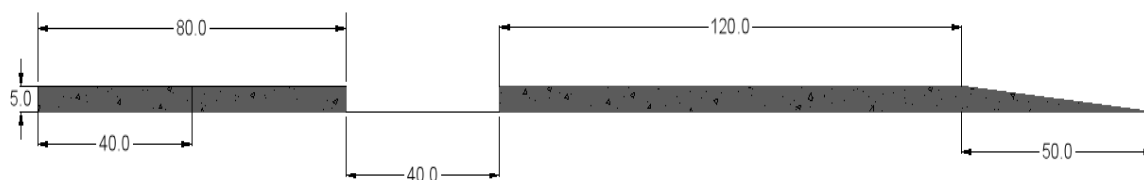
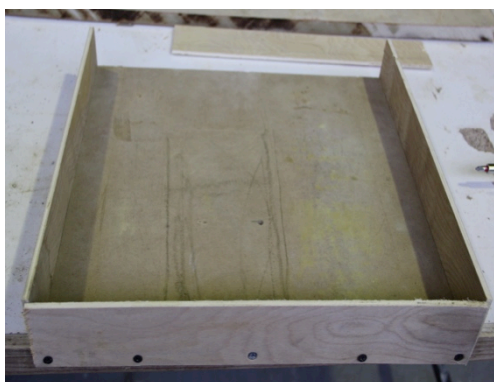


Figura III.7 – Vista lateral da secção de teste

A secção de teste localiza-se a 6,7 m a jusante do início do canal. O segmento a montante faz a passagem gradual, por meio de uma rampa, do fundo do canal para a secção teste. Estes trechos foram executados em betão, que foram posteriormente ceresitados, para que a superfície apresente menor atrito face ao escoamento (Figura III.8).



a) Cofragem



b) Bloco de betão

Figura III.8 – Construção da secção de teste para realizar a bacia de sedimentos

### 3. Caracterização dos Sedimentos

Será feita de seguida uma caracterização de todos os sedimentos que foram utilizados nos ensaios laboratoriais. A caracterização passa pela identificação do local de recolha e pela determinação das principais propriedades da amostra, nomeadamente o teor em água, o peso volúmico e a análise granulométrica.



### 3.1. Amostras Naturais

As amostras naturais usadas nos ensaios foram recolhidas no seu ambiente natural, na Marinha de Santiago, junto ao Campus da Universidade de Aveiro (Figura III.9). Dadas as condições limitadas de acesso optou-se pela recolha de amostras remexidas com o recurso a “amostrador” de operação manual.



Figura III.9 – Local de recolha das amostras de sedimentos

As amostras foram objeto de um conjunto de ensaios para a determinação das suas características, nomeadamente:

- **Teor em Água em estado natural**

O teor em água foi determinado através da avaliação da diferença de massa após secagem em estufa de acordo com a equação (3), resultando os valores apresentados na Tabela III.7.

$$W = \frac{m_w}{m_s} 100 \quad (3)$$

Tabela III.7 – Teor em água das amostras analisadas em laboratório

| Amostra | $m_k$ | $m_s$ | $m_w$ | W (%) | W médio (%) |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 1       | 40,58 | 26,27 | 14,31 | 54,5  | 51,9        |
| 2       | 51,61 | 34,17 | 17,44 | 51,0  |             |
| 3       | 72,40 | 48,56 | 23,84 | 49,1  |             |
| 4       | 57,06 | 37,29 | 19,77 | 53,0  |             |

- **Peso Volúmico**

O peso volúmico dos sedimentos foi obtido recorrendo ao processo descrito por Bardet (1997) para solos coesivos. O procedimento consiste na pesagem do solo natural e do solo envolvido em parafina e a determinação do peso através da diferença de pesos de acordo com a equação 4. Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela III.8.



Figura III.10 – Amostras de solo envolvido na parafina

$$\gamma = \gamma_w \frac{m_A}{m_P - m_I - \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_P}\right)(m_P - W)} \quad (4)$$

Adotando o valor médio do teor em água ( $W=51,9\%$ ) é possível também determinar o peso volúmico seco, pela equação (5). Os valores obtidos apresentam-se na Tabela III.8.

Nos cálculos considerou-se que um peso volúmico da água ( $\gamma_w$ ) de  $9,81 \text{ kN/m}^3$  e o peso volúmico da parafina ( $\gamma_p$ ) de  $9,32 \text{ kN/m}^3$ .

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W} \quad (5)$$

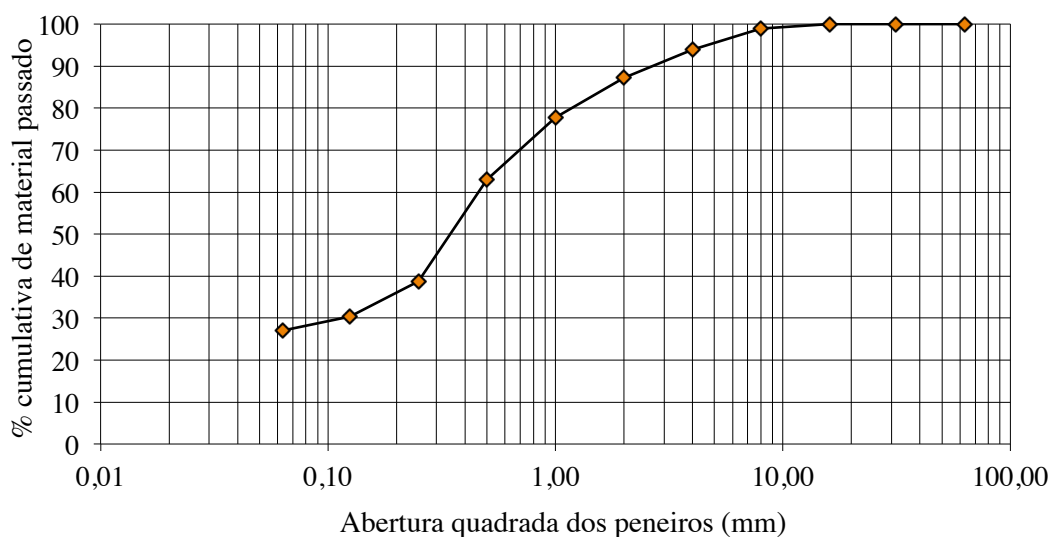


Tabela III.8 – Pesos volúnicos das amostras analisadas em laboratório

| Amostra | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{\text{médio}}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) |
|---------|-------------------------------|--|---------------------------------|
| 1       | 17,2                          |  |                                 |
| 2       | 18,4                          |  |                                 |
| 3       | 18,2                          | 18,2   | 12,0                            |
| 4       | 19,0                          |  |                                 |

### • Análise Granulométrica

Efetuiu-se também a análise granulométrica de uma amostra representativa. A separação da fração fina da amostra foi efetuada por peneiração em meio húmido (peneiro de abertura 0,075 mm). A parte da amostra retida no peneiro foi seca na estufa a 100°C e analisada a sua distribuição granulométrica através dos peneiros da série ASTM. Quanto à fração fina também foi levada à estufa a 100°C para a sua secagem, e verificou-se que a quantidade era desprezável. Verificou-se que o solo analisado é constituído por argilas e siltes, areias e britas, na proporção de cerca de 13% de “britas”, 60% de areias e 27% de siltes e argilas (Figura III.11). De acordo com estes resultados e com o referido por Gomes e Ladeira (1989), considera-se que a amostra natural pode ser qualificada de Areia Lodosa.



|              |       |       |        |       |       |        |  |
|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--|
| Argila/Silte | fina  | média | grossa | fina  | média | grossa |  |
|              | Areia |       |        | Brita |       |        |  |

Figura III.11 – Curva granulométrica do solo recolhido

### 3.2. Amostras Tratadas

As amostras tratadas diferenciam-se das anteriores pelo facto destas, terem sido passadas previamente no peneiro 1/2'' (12,5 mm) da série ASTM. Este procedimento teve como objetivo a remoção de materiais presentes na amostra (Figura III.12).



Figura III.12 – Material retido no peneiro 1/2''

O tratamento do material teve como objetivo analisar se o material grosseiro presente nas amostras tinha um efeito estabilizador e consequentemente reduzia os volumes de sedimentos transportados pelo escoamento.

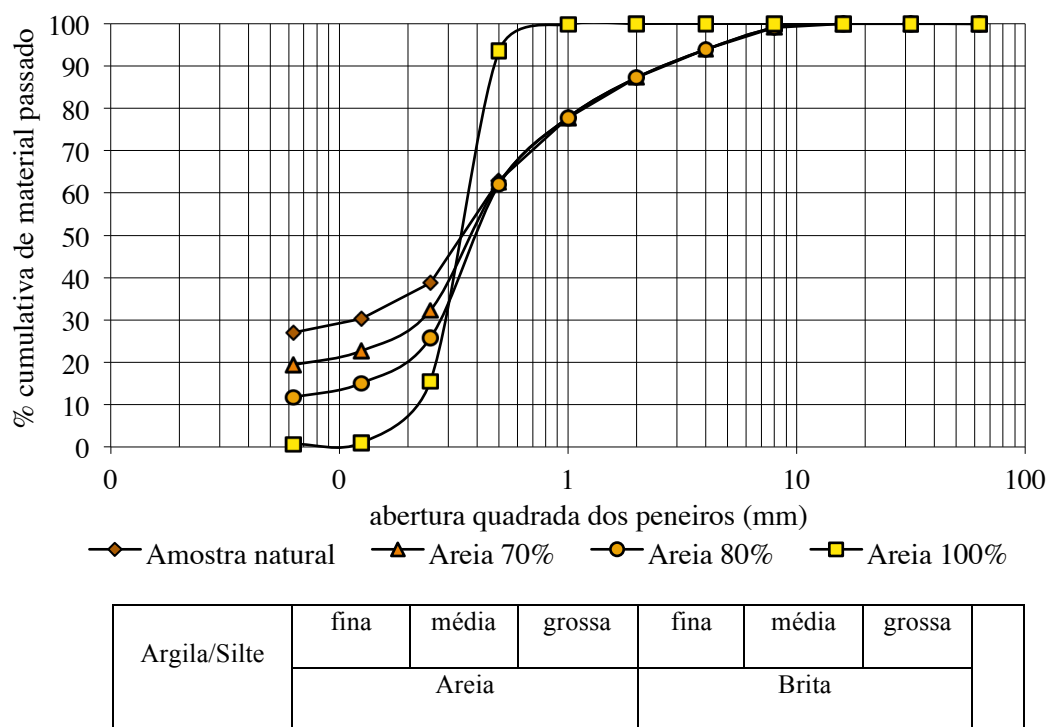


Figura III.13 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas com areia

### 3.3. Misturas com Areia

As misturas foram criadas a partir das amostras naturais, com a adição de diferentes quantidades de areia. A alteração da percentagem de areia teve como objetivo, analisar o impacto da variação de areia no volume erodido. Inicialmente foi avaliada a percentagem de areia de amostra natural, tendo-se obtido um valor de 60,24%. Posteriormente foram adicionados volumes de areia para a criação de amostras com percentagens de 70%, 80% e 100% de areia. A distribuição granulométrica da areia adicionada apresenta-se na Figura III.13. Foram então realizados três ensaios adicionais, para a velocidade máxima do escoamento (0,842 m/s) tendo em conta as percentagens de areia mencionadas anteriormente.

### 4. Metodologias de Avaliação de Volumes

As metodologias de avaliação do volume de material erodido baseou-se na quantificação do material necessário para a reposição, e a outra consistiu na avaliação de cotas com o auxílio de uns marcadores. A primeira metodologia consistia na reposição de um volume de sedimentos tal, que perfazia o volume de vazios gerado pelo ensaio. Os marcadores foram realizados através de elementos em madeira, de altura igual à altura da secção de teste. Estes permitiram avaliar a cota do nível a que se situava o material após o ensaio, definindo-se a diferença de cotas a que cada marcador esteve sujeito durante o ensaio.

Os marcadores foram dispostos na secção de forma a criar uma malha representada na Figura III.14.

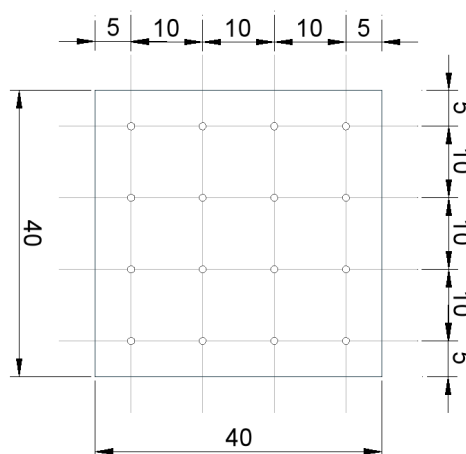


Figura III.14 – Posição dos elementos de medição de cotas designados por marcadores (cotagem em centímetros)



a) Colocação dos sedimentos



b) Nivelamento da superfície

Figura III.15 – Colocação das amostras na secção de teste

Os dados obtidos nos ensaios permitiram criar perfis longitudinais da erosão ocorrida e admitindo uma área de influência para cada elemento determinou-se o volume de material erodido. Considerou-se que na área de influência de cada marcador ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) a erosão foi idêntica à registada junto ao elemento de medição.

O procedimento de realização dos ensaios tem inerente um processo repetitivo que se inicia-se com a colocação dos sedimentos na secção de teste, seguido do nivelamento dos sedimentos em relação aos blocos de betão (Figura III.15). Posteriormente são inseridos os marcadores de madeira com a ajuda de uma placa de acrílico previamente furada (Figura III.16).



a) Placa auxiliar



b) Marcadores colocados na secção de teste

Figura III.16 – Colocação dos marcadores de madeira

Ao longo do documento assumiu-se que o processo 1 ( $p_1$ ) corresponde ao método de reposição de material, e que o processo 2 ( $p_2$ ) corresponde ao método de determinação de cotas facilitando assim a identificação das duas metodologias.



---

## **IV. Ensaaios**

---

## 1. Ensaaios Preliminares

Começaram por se realizar três séries de ensaios preliminares (cada série com 4 ensaios de diferente duração), com vista à avaliação da duração (relação entre o tempo do ensaio e os resultados obtidos) e à forma de estimativa do volume erodido. Posteriormente foram feitos três grupos de ensaios, com o objetivo de analisar visualmente as condições críticas do escoamento.

### 1.1. Tempo de Ensaio

Realizaram-se uma série de ensaios preliminares com o objetivo, de identificar a duração a adotar para cada ensaio. Para tal fizeram-se ensaios com diferentes períodos de tempo, com as amostras em estado natural, e mediram-se os volumes erodidos utilizando a metodologia de reposição de material (Tabela IV.1). Estes ensaios foram realizados apenas para uma velocidade de escoamento, correspondendo a 0,801 m/s. Foram feitas três séries de ensaios, cada uma com 4 tempos de duração distintos (5, 10, 20 e 30 minutos). A terceira série difere das anteriores pois foram inseridos na secção de teste os marcadores de madeira, com o objetivo de avaliar se os marcadores interferiam no comportamento das amostras, alterando o padrão de erosão.

Tabela IV.1 – Resultado do volume erodido ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) em função da duração do ensaio (metodologia p<sub>1</sub>)

| <b>Tempo<br/>(minutos)</b> | <b>Ensaio 1</b> | <b>Ensaio 2</b> | <b>Ensaio 3</b> | <b>Média</b> | <b>Incerteza<br/>(%)</b> |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------------------|
| 5                          | 225             | 88              | 55              | 123          | 139                      |
| 10                         | 269             | 319             | 269             | 286          | 17                       |
| 20                         | 297             | 363             | 357             | 339          | 19                       |
| 30                         | 341             | 297             | 275             | 304          | 22                       |

Os resultados mostram que a presença dos marcadores não têm uma interferência significativa no comportamento registado. Embora se tenha verificado que nesta série de ensaios ocorreu uma ligeira diminuição do volume de erosão, os registados são da mesma ordem de grandeza da incerteza associada à medição dos próprios volumes erodidos. Na Tabela IV.1, a coluna da incerteza representa a relação entre a diferença dos valores máximo e mínimo, e a média dos resultados dos 3 ensaios correspondentes a cada tempo avaliado. Verificou-se que a incerteza média associada à quantificação dos volumes nos



diversos ensaios, sem contabilizar os ensaios de 5 minutos, corresponde ao valor de 19 %. Omitiu-se o resultado dos ensaios de 5 minutos na avaliação da média, devido ao valor de volume erodido obtido no ensaio 1, que comparando com todos os restantes é divergente. Analisando apenas o ensaio 2 e 3 para uma duração de 5 minutos obtém-se uma incerteza média associada de 27 %, que é relativamente próxima da incerteza alcançada nos ensaios, para a duração mais elevada (30 minutos).

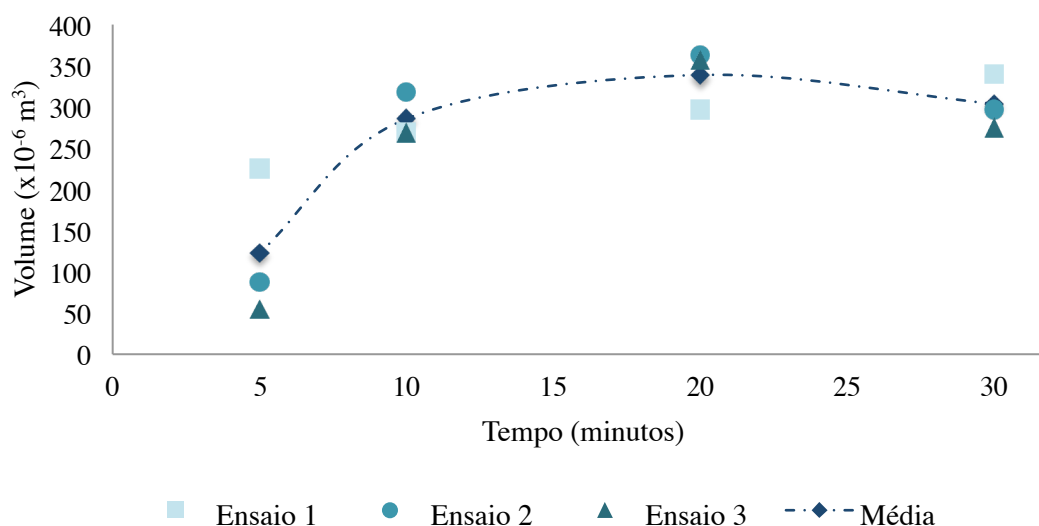


Figura IV.1 – Volume erodido em função da duração do ensaio (metodologia p<sub>1</sub>)

Observando a Figura IV.1 verifica-se que a partir de ensaios de duração de 10 minutos não há praticamente aumento do volume erodido. Os resultados obtidos apresentam alguma dispersão que pode dever-se a pontos singulares da amostra ou a dificuldades na avaliação dos volumes devido às características das próprias amostras. Com base nestes resultados e tentando otimizar a relação entre o tempo do ensaio e a estabilidade do comportamento, admitiu-se que a duração a adotar para os ensaios seria de 15 minutos.

## 1.2. Análise do Volume Erodido

Os ensaios preliminares para além de permitirem definir a duração dos ensaios, também possibilitaram comparar os dois processos de avaliação do volume erodido. Analisou-se apenas a terceira série de ensaios, pois essa série é a única onde se introduziram os

marcadores na amostra. A Figura IV.2 mostra a designação dos marcadores, facilitando a análise dos resultados apresentados na Tabela IV.2.

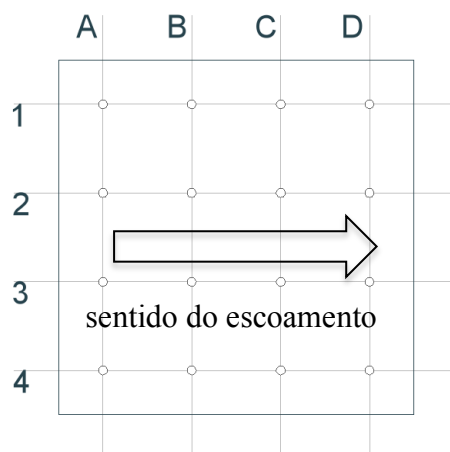


Figura IV.2 – Designação dos marcadores

Tabela IV.2 – Profundidades de erosão registadas nos marcadores (mm)

| Tempo     | Marcadores |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| (minutos) | A1         | A2 | A3 | A4 | B1 | B2 | B3 | B4 | C1 | C2 | C3 | C4 | D1 | D2 | D3 | D4 |
| 5         | -2         | -1 | -2 | -3 | -1 | -2 | -1 | 0  | 0  | -1 | -1 | -1 | 0  | -1 | 0  | -1 |
| 10        | -5         | -4 | -5 | -4 | -2 | -2 | -3 | -2 | -2 | -3 | -1 | -2 | -2 | -1 | -2 | -1 |
| 20        | -7         | -8 | -5 | -7 | -3 | -4 | -2 | -3 | -3 | -2 | -3 | -3 | -3 | -2 | -2 | -4 |
| 30        | -8         | -8 | -9 | -8 | -3 | -5 | -6 | -3 | -3 | -4 | -3 | -3 | -2 | -4 | -5 | -4 |

Após se obter o registo da variação de cota verificada em cada marcador, considerando a área de influência de cada marcador, determinou-se um volume de erosão para cada ensaio. Comparando os volumes de erosão obtidos pelos dois processos (Tabela IV.3), verificou-se que existem diferenças significativas, com avaliação de maiores volume no processo  $p_2$ , que chegam a atingir valores superiores de quase 8 vezes. As diferenças registadas entre os dois processos pode dever-se ao facto da profundidade de erosão junto ao marcador ser superior à erosão representativa da área de influência. Atendendo aos resultados obtidos, os volumes de erosão considerados em todos os ensaios foram obtidos pelo processo  $p_1$ . Embora o processo  $p_2$  não tenha sido considerado na determinação dos volumes erodidos,

os ensaios foram realizados sempre com a presença dos marcadores na amostra, pois possibilitam a criação de perfis longitudinais de erosão.

Tabela IV.3 – Resultado dos volumes obtidos pelos dois processos de quantificação dos volumes

| Tempo<br>(minutos) | Volume ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) |                |
|--------------------|---|----------------|
|                    | P <sub>1</sub>                          | P <sub>2</sub> |
| 5                  | 55                                      | 425            |
| 10                 | 269                                     | 1025           |
| 20                 | 357                                     | 1525           |
| 30                 | 275                                     | 1950           |

### 1.3. Análise Visual

Foram realizados uma série de ensaios com o objetivo de analisar visualmente o comportamento das amostras face às condições do escoamento.

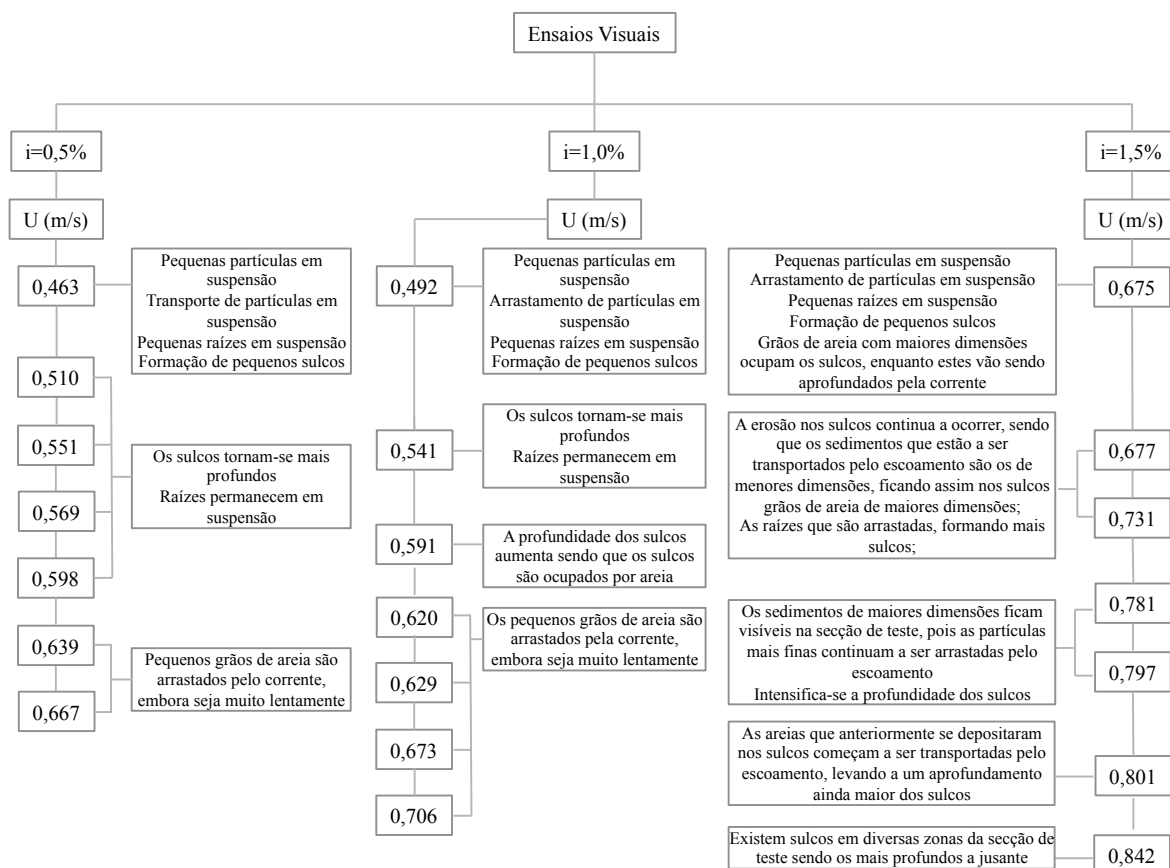


Figura IV.3 – Registo visual do comportamento das amostras para as condições do escoamento

Estes ensaios tiveram a duração de 5 minutos, sendo que ao fim dos quais o caudal bombeado era aumentado. O procedimento foi repetido para os 7 caudais, para as inclinações de 0,5%, 1,0%, 1,5%. Na Figura IV.3 apresenta-se uma descrição das mudanças para as diferentes velocidades do escoamento. A erosão iniciou-se com a limpeza das partículas superficiais, seguindo-se o aparecimento dos primeiros sulcos. Com a continuação do escoamento, os sedimentos de menores dimensões entram em circulação deixando a descoberto os sedimentos de maiores dimensões. Aumentando a velocidade do escoamento os sedimentos de maiores dimensões através da fricção entre eles aumentam a profundidade dos sulcos. Com o escoamento em velocidade máxima os sulcos existentes tornam-se mais profundos, aparecem novos sulco e os sedimentos de maiores dimensões são arrastados pelo escoamento.

## 2. Cenários Testados

Após a análise dos ensaios preliminares realizou-se o primeiro grupo de ensaios. Nestes ensaios foram variadas as condições hidrodinâmicas do escoamento, através da variação da inclinação do canal e do caudal bombeado, para as amostras naturais e para as tratadas laboratorialmente. Nos diversos ensaios foram quantificados os volumes de sedimentos erodidos da secção teste e as respetivas taxas de erosão. As velocidades do escoamento durante os ensaios permitiram a estimativa das tensões de arrastamento associadas aos escoamentos ensaiados.

Como referido anteriormente, foram realizados diversos grupos de ensaios. Num grupo de ensaios foram testados os sedimentos trazidos de campo e colocados diretamente na secção de teste, em outro grupo de ensaios os sedimentos trazidos do campo foram passado por um peneiro. Posteriormente foram realizados dois ensaios de longa duração, utilizando sedimentos naturais e sedimentos tratados. Por fim foram feitos ensaios de misturas com areias. Este tipo de ensaios tinha como objetivo perceber quais as consequências do aumento da percentagem de areia na amostra. A realização dos ensaios descritos anteriormente permitiu recolher um conjunto de resultados que se analisam de seguida.

### 2.1. Amostras Naturais e Tratadas

Os ensaios com as amostras naturais e tratadas foram realizados para as diferentes velocidades de escoamento, para uma duração de 15 minutos e segundo o processo p<sub>1</sub> de

quantificação de volumes erodidos (Tabela IV.4). Estes ensaios permitiram avaliar o comportamento das amostras para diferentes velocidades de escoamento, analisando-se os volumes de transporte sedimentar obtidos (Figura IV.4 e Figura IV.5).

Nos ensaios realizados para amostras no estado natural (Figura IV.4), verifica-se que o volume de erosão medido varia desde  $22 \times 10^{-6}$  até  $148 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , sendo que, para as amostras tratadas o volume varia desde  $253 \times 10^{-6}$  até  $1060 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  (Figura IV.5).

Tabela IV.4 – Resultados dos ensaios sobre amostras no estado natural e tratadas

| i (%) | Q <sub>i</sub> (l/s) | h (m) | U (m/s) | Volume erosão ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) |                 |
|-------|----------------------|-------|---------|--|-----------------|
|       |                      |       |         | Amostra Natural                                | Amostra Tratada |
| 0,5   | 8,3                  | 0,045 | 0,463   | 22   | 253             |
|       | 10,4                 | 0,051 | 0,510   | 33   | 341             |
|       | 12,5                 | 0,057 | 0,551   | 33   | 429             |
|       | 14,3                 | 0,063 | 0,569   | 27   | 571             |
|       | 16,2                 | 0,068 | 0,598   | 38   | 615             |
|       | 18,2                 | 0,071 | 0,639   | 55   | 604             |
|       | 20,1                 | 0,075 | 0,667   | 55   | 615             |
| 1,0   | 8,3                  | 0,042 | 0,492   | 33   | 374             |
|       | 10,4                 | 0,048 | 0,541   | 33   | 418             |
|       | 12,5                 | 0,053 | 0,591   | 22   | 670             |
|       | 14,3                 | 0,057 | 0,629   | 55   | 824             |
|       | 16,2                 | 0,065 | 0,620   | 66   | 890             |
|       | 18,2                 | 0,068 | 0,673   | 121  | 967             |
|       | 20,1                 | 0,071 | 0,706   | 132  | 1055            |
| 1,5   | 8,3                  | 0,031 | 0,677   | 33   | 451             |
|       | 10,4                 | 0,039 | 0,675   | 33   | 538             |
|       | 12,5                 | 0,043 | 0,731   | 44   | 560             |
|       | 14,3                 | 0,045 | 0,797   | 88   | 896             |
|       | 16,2                 | 0,052 | 0,781   | 110  | 989             |
|       | 18,2                 | 0,057 | 0,801   | 132  | 1071            |
|       | 20,1                 | 0,060 | 0,842   | 148  | 1060            |

No caso das amostras naturais, verifica-se que para caudais pequenos (8,3 a 12,5 l/s), e independentemente da inclinação do canal, o volume de sedimentos transportado é pequeno quando comparado com os volumes de transporte registados para caudais mais elevados. Para velocidades baixas o volume de erosão mantém-se praticamente constante

mas, a partir do momento em que as velocidades aumentam (a partir de 0,65 m/s), o volume de erosão assume igual comportamento de forma aproximadamente linear (Figura IV.4).

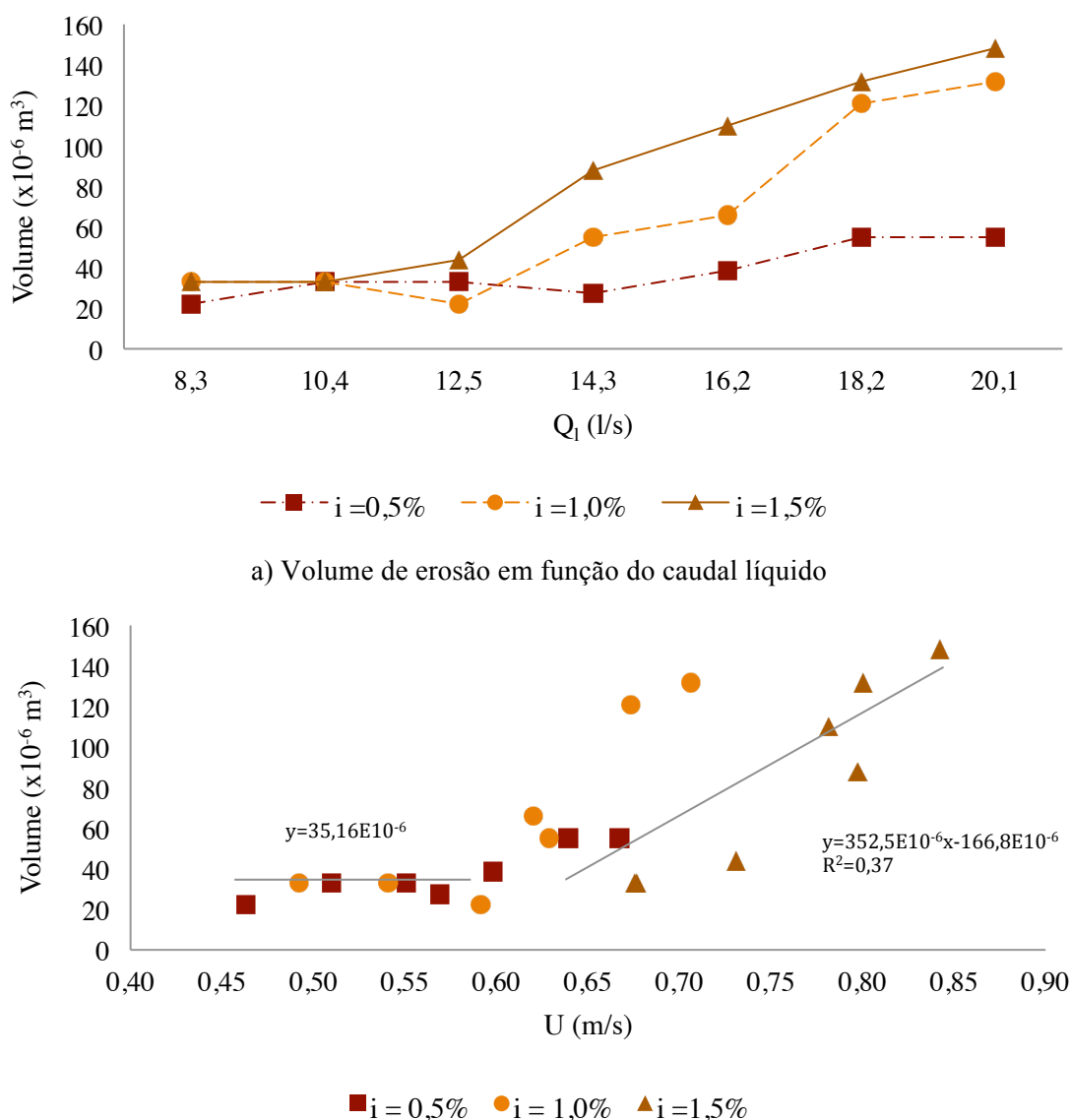
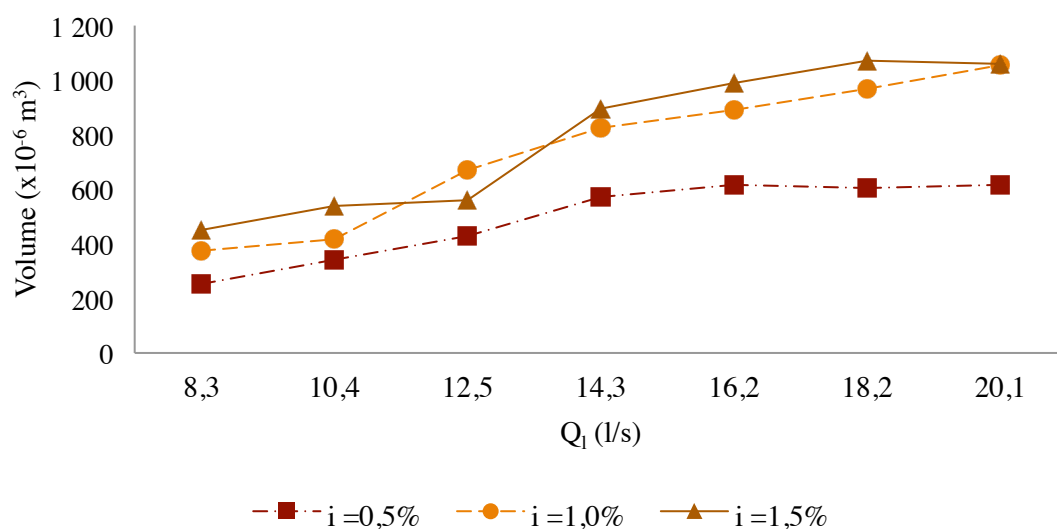


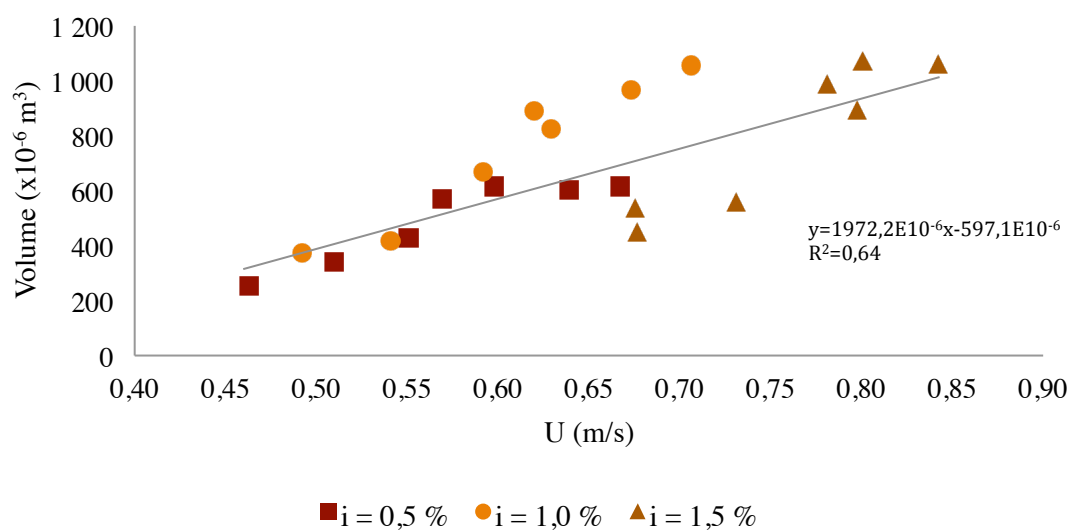
Figura IV.4 – Ensaaios realizados sobre amostras no estado natural

A ordem de grandeza dos resultados dos volumes erodidos das amostras tratadas, é significativamente superior à das amostras naturais, mas verifica-se que o comportamento é similar para os dois tipos de amostras. Neste caso, observa-se que o volume erodido aumenta ligeiramente para caudais e velocidades baixas até 0,55 m/s, contrapondo com

alguma dispersão nos resultados, para valores mais elevados de caudais e de velocidade (Figura IV.5).



a) Volume de erosão em função do caudal líquido



b) Volume de erosão em função da velocidade

Figura IV.5 – Ensaio realizados sobre amostras tratadas

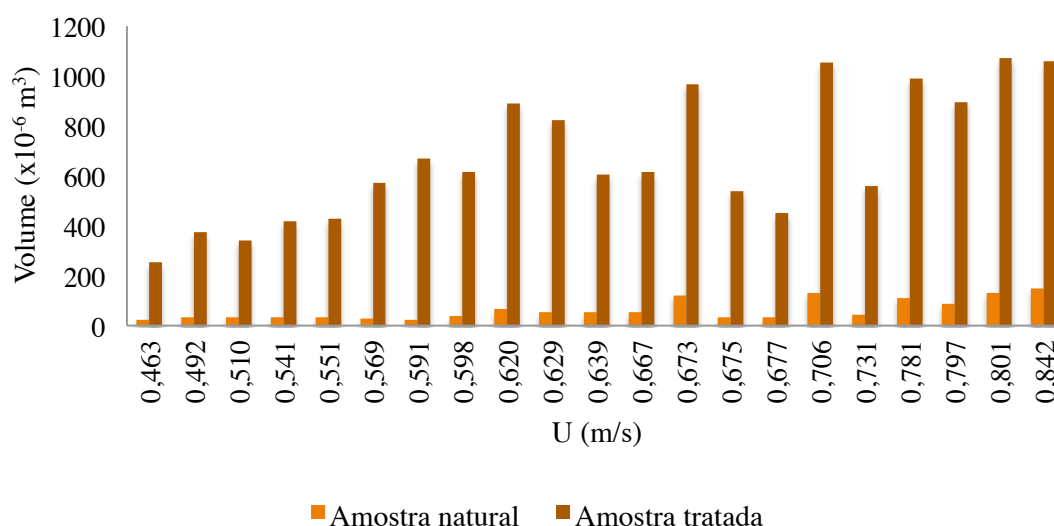
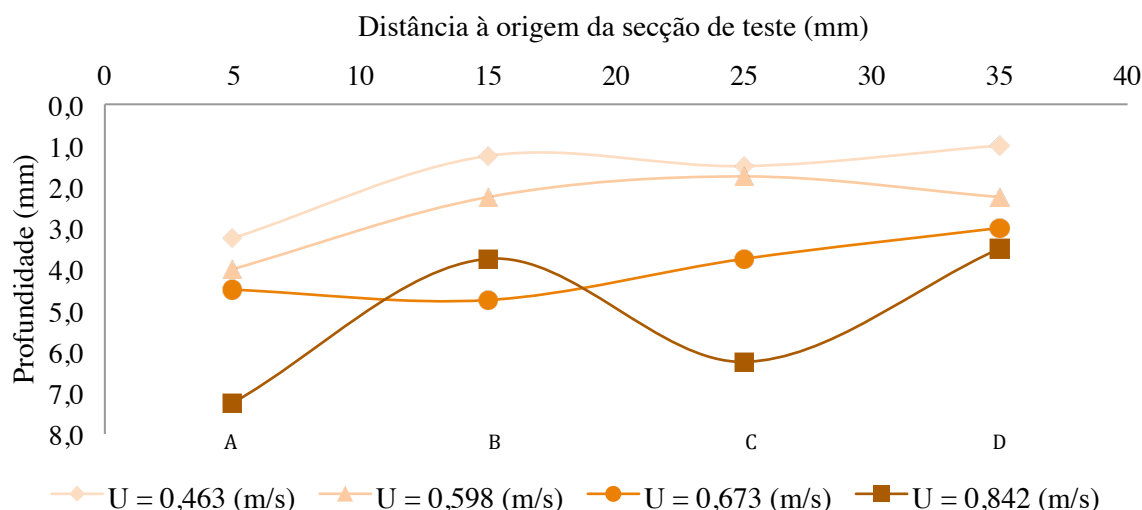


Figura IV.6 – Comparação de volumes erodidos para os dois tipos de amostra

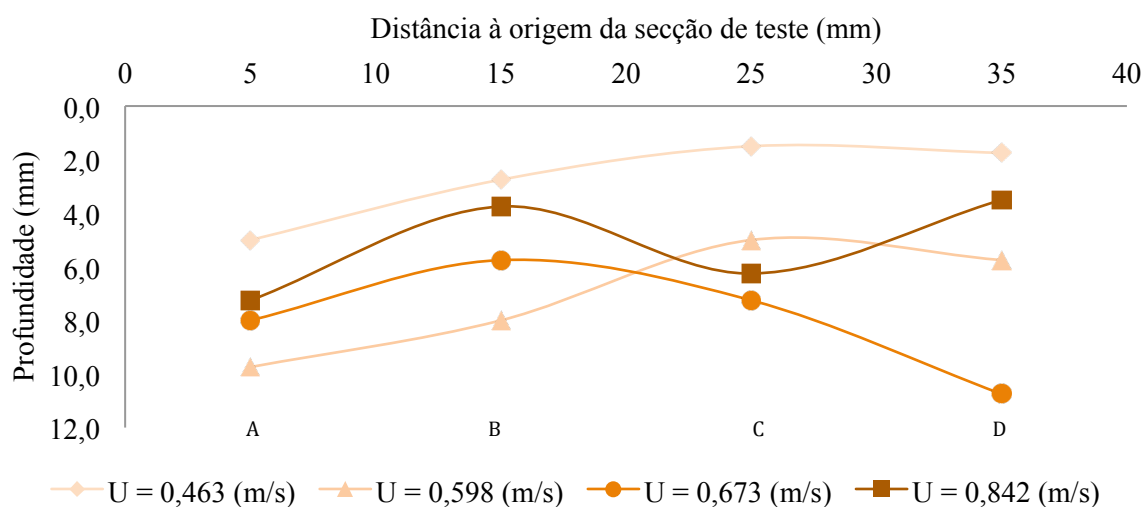
Os ensaios realizados permitem também estabelecer comparações entre os dois tipos de amostras. A Figura IV.6 apresenta as diferenças dos volumes de erosão de cada tipo de amostra, em função da velocidade de escoamento. Observa-se que para a velocidade máxima a diferença relativa de volume de erosão é a menor, com uma diferença de cerca de 7 vezes. Em suma, o volume erodido nas amostras naturais apresenta em média, cerca de 13 vezes menor do que o volume erodido obtido para as amostras tratadas.

O processo  $p_2$  não foi tido em conta na estimativa dos volumes erodidos, no entanto analisou-se a variação das cotas dos marcadores pois pode fornecer elementos importantes na avaliação do local onde ocorre maior erosão. Com os valores obtidos pelos marcadores, foram criados perfis longitudinais, que traduzem a variação da erosão ao longo do perfil longitudinal, na secção de teste. Os valores dos perfis longitudinais correspondem à média de cada segmento perpendicular ao escoamento (IV.2).





a) Amostras naturais



b) Amostras tratadas

Figura IV.7 – Perfis longitudinais do escoamento

Na Figura IV.7 apresentam-se os perfis para apenas quatro velocidades do escoamento (0,463; 0,591; 0,706; 0,842 m/s).

De forma geral para os dois tipos de amostras, verifica-se que a zona de maior erosão localiza-se em diferentes locais dependendo da velocidade do escoamento do ensaio. Para baixas velocidades, a zona de maior erosão, para os dois tipos de amostras, localiza-se a montante na interface entre o bloco de betão e a secção de teste. O aumento da velocidade leva a que a zona de erosão se propague para jusante, sendo mais notório nas amostras tratadas. Verifica-se também que para a máxima velocidade existe uma zona central, onde a erosão é mais significativa.



$U=0,463 \text{ m/s}$



$U=0,463 \text{ m/s}$



$U=0,598 \text{ m/s}$



$U=0,598 \text{ m/s}$



$U=0,673 \text{ m/s}$



$U=0,673 \text{ m/s}$



$U=0,842 \text{ m/s}$



$U=0,842 \text{ m/s}$

a) Amostra natural

b) Amostra tratada

Figura IV.8 – Registo fotográfico da erosão ocorrida para amostras e velocidades diferentes

Pode-se verificar que existe uma exceção, nas amostras tratadas para a velocidade de  $0,673 \text{ m/s}$ , a maior quantidade de volume erodido localiza-se a jusante da secção de teste.

Este facto pode dever-se a pontos singulares da amostra que originaram um volume maior de erosão. Genericamente, as amostras tratadas têm valores maiores de profundidade de erosão e sofreram um volume de erosão maior que as amostras naturais (Figura IV.8).

## 2.2. Longa Duração

Os ensaios de longa duração foram realizados para um período de 480 minutos, para a velocidade máxima admitida para o escoamento (0,842 m/s) e para os dois tipos de amostras. Estes ensaios tiveram como objetivo avaliar o impacto da variação do tempo de ensaio nos volumes erodidos.



a) Amostra natural

b) Amostra tratada

Figura IV.9 – Registo fotográfico da erosão ocorrida nos ensaios longos

Os resultados obtidos mostraram que a amostra natural sofreu um volume de erosão de  $687 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , correspondendo a cerca de 9% do volume total da secção de teste, enquanto que, a amostra tratada os valores de erosão registados foram de  $1560 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , correspondendo por sua vez a cerca de 20 % do volume total. A diferença entre os ensaios curtos (15 minutos) e os ensaios longos (480 minutos) mostraram que para a amostra natural, a erosão aumentou de  $148 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  para  $687 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ . No caso das amostras tratadas o aumento é inferior, já que no ensaio curto registou-se um volume de erosão de  $1060 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  e no ensaio longo de  $1560 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  (Figuras IV.9 e IV.10).

Fazendo a projecção da erosão em 480 minutos, com base na taxa de erosão constante obtida nos ensaios curtos (15 minutos), verifica-se que o volume de erosão registado é inferior ao esperado (Tabela IV.5). A taxa de erosão utilizada na projecção correspondeu a  $1896 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$  para as amostras naturais e  $13397 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$  para as amostras tratadas. Os valores entre a projecção e os volumes obtidos revelaram que a diferença é superior no caso das amostras tratadas comparativamente às amostras naturais.

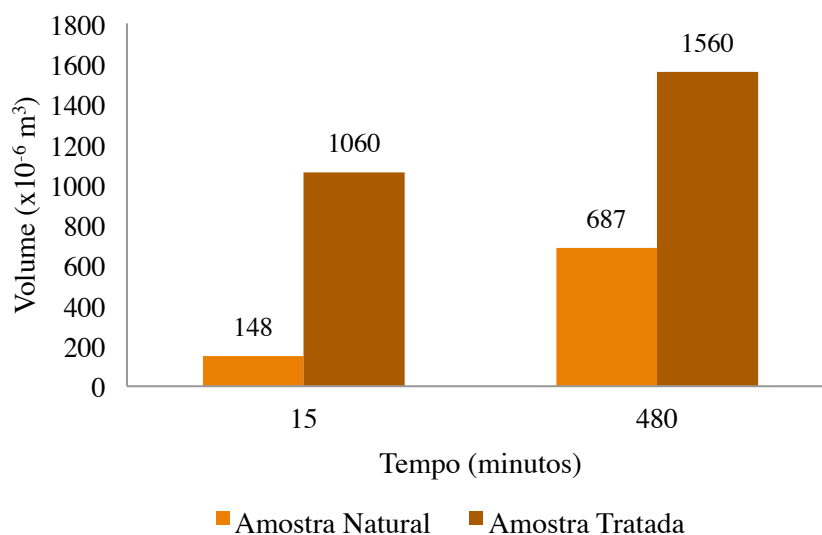


Figura IV.10 – Volume erodido em função da duração do ensaio e do tipo de amostra

Tabela IV.5 – Projeção dos volumes de erosão ( $\times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) em 480 minutos, com base na taxa de erosão registada nos ensaios de 15 minutos

|                    | Amostra Natural | Amostra Tratada |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| Ensaaios Longos    | 687             | 1560            |
| Projeção           | 4747            | 33934           |
| Relação de Volumes | 6,9             | 21,8            |

### 2.3. Misturas com Areia

Foram realizados ensaios em que a percentagem da areia na amostra foi aumentada, permitindo a análise do impacto da variação da percentagem de areia no volume de erosão. Os ensaios foram realizados para a velocidade de 0,842 m/s e com a duração de 15 minutos. A análise da curva granulométrica da amostra natural revelou que a quantidade de areia representa cerca de 60% da massa total. As amostras foram obtidas, introduzindo-se na amostra natural uma quantidade de areia tal, que elevasse a respetiva percentagem na amostra (Figura IV.11).





Figura IV.11 – Registro fotográficos da areia utilizada nos ensaios

A análise dos volumes erodidos de cada composição (Figura IV.12), verifica-se que ocorre um aumento do volume erodido de cerca de três vezes mais, entre a amostra natural e a amostra com 70 % de areia, e entre esta e a amostra com 80 % de areia. O último ensaio permitiu determinar o volume de erosão registado na amostra com 100 % de areia, tendo-se verificado os maiores volumes de erosão. A Figura IV.13 mostra que o ensaio com areia difere dos restantes, na medida em que, a erosão ocorre com maior incidência a jusante na secção de teste. Estes ensaios permitiram avaliar a influência da percentagem de areia no volume de erosão de cada ensaio, levando a que este assumia valores de maior dimensão com o aumento das percentagens de sedimentos não coesivos.

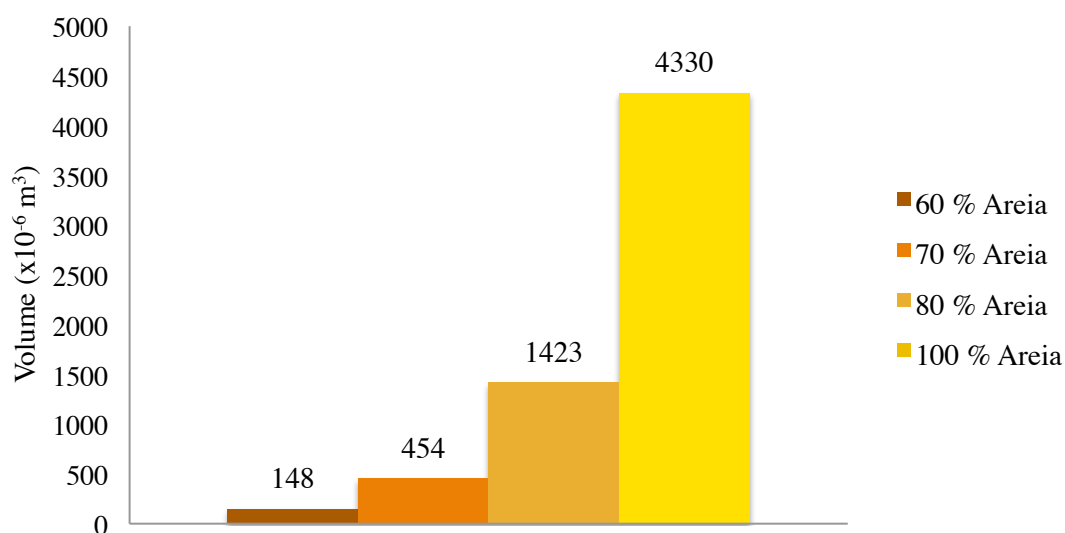


Figura IV.12 – Volume de erosão em função da % de areia e da velocidade do escoamento de 0,842 m/s



a) Vista superior



b) Vista lateral

Figura IV.13 – Resultados do ensaio para uma mistura com 100% de areia

### 3. Análise Numérica

No capítulo II foram apresentadas várias formulações para a determinação da velocidade de atrito junto ao fundo. As velocidades de atrito no fundo associadas aos diversos escoamentos ensaiados no laboratório, foram estimadas através das formulações de Manning e de Von Karman-Prandtl. Na aplicação das expressões admitiu-se que a natureza do leito era terra irregular ( $n=0,022 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ) era constituída principalmente por silte/areia ( $z_0=0,05 \text{ mm}$ ). Avaliando todas as condições de escoamento associadas, a diferença

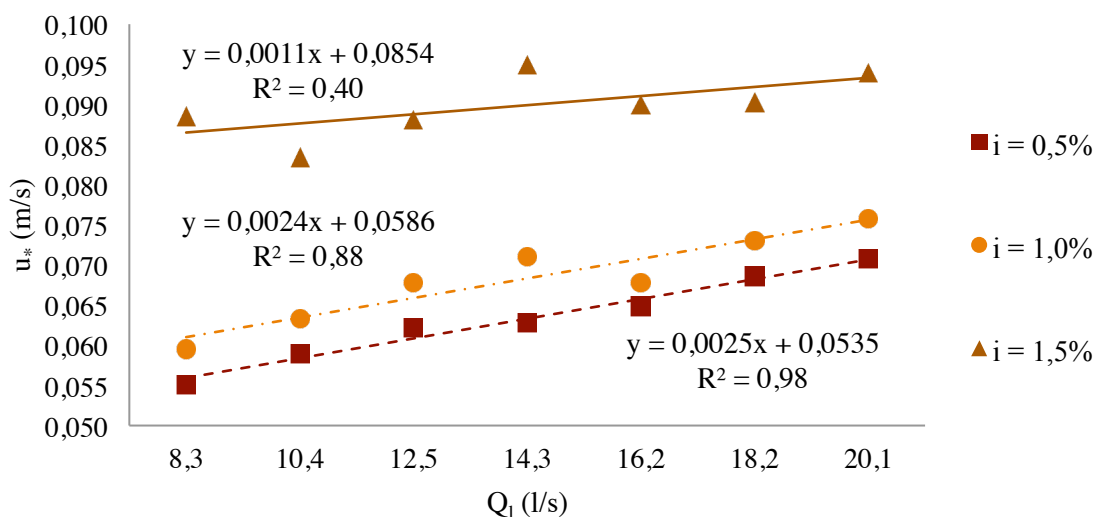
máxima relativa que resulta entre as duas formulações é de 10,4%. Tendo em conta que a diferença relativa entre as formulações é baixa, assumiu-se que a velocidade de atrito no fundo podia ser representada pela média do resultado das duas formulações (Tabela IV.6).

Tabela IV.6 – Estimativa da velocidade de atrito no fundo e da tensão de arrastamento com recurso a formulações

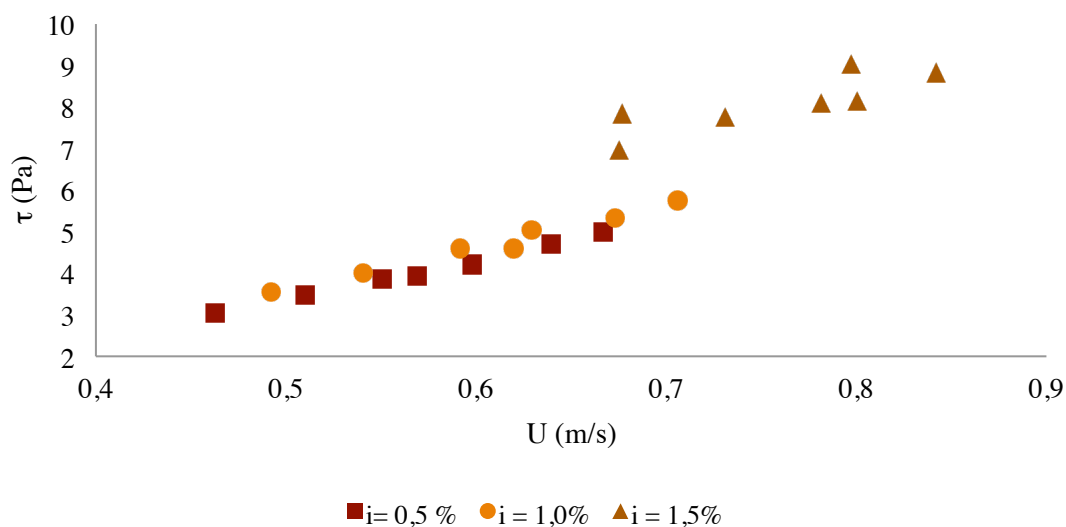
| U (m/s) | h (m) | z (m) | u* (m/s) |               |       | Diferença<br>relativa (%) | $\tau$<br>(Pa) |
|---------|-------|-------|----------|---------------|-------|---------------------------|----------------|
|         |       |       | Manning  | Von Karman-P. | Média |                           |                |
| 0,463   | 0,045 | 0,013 | 0,054    | 0,056         | 0,055 | 4,0                       | 3,04           |
| 0,510   | 0,051 | 0,015 | 0,058    | 0,060         | 0,059 | 2,3                       | 3,47           |
| 0,551   | 0,057 | 0,017 | 0,062    | 0,062         | 0,062 | 1,0                       | 3,86           |
| 0,569   | 0,063 | 0,019 | 0,063    | 0,063         | 0,063 | 0,2                       | 3,94           |
| 0,598   | 0,068 | 0,020 | 0,065    | 0,065         | 0,065 | 1,0                       | 4,21           |
| 0,639   | 0,071 | 0,021 | 0,069    | 0,068         | 0,069 | 1,5                       | 4,71           |
| 0,667   | 0,075 | 0,023 | 0,071    | 0,070         | 0,071 | 2,0                       | 5,00           |
| 0,492   | 0,042 | 0,013 | 0,058    | 0,061         | 0,059 | 4,9                       | 3,54           |
| 0,541   | 0,048 | 0,014 | 0,062    | 0,064         | 0,063 | 3,1                       | 4,02           |
| 0,591   | 0,053 | 0,016 | 0,067    | 0,068         | 0,068 | 1,9                       | 4,60           |
| 0,629   | 0,057 | 0,017 | 0,071    | 0,071         | 0,071 | 1,0                       | 5,03           |
| 0,620   | 0,065 | 0,020 | 0,068    | 0,068         | 0,068 | 0,6                       | 4,60           |
| 0,673   | 0,068 | 0,020 | 0,073    | 0,073         | 0,073 | 0,9                       | 5,34           |
| 0,706   | 0,071 | 0,021 | 0,076    | 0,075         | 0,076 | 1,5                       | 5,74           |
| 0,677   | 0,031 | 0,009 | 0,084    | 0,093         | 0,089 | 10,4                      | 7,84           |
| 0,675   | 0,039 | 0,012 | 0,081    | 0,086         | 0,083 | 6,4                       | 6,97           |
| 0,731   | 0,043 | 0,013 | 0,086    | 0,090         | 0,088 | 4,7                       | 7,76           |
| 0,797   | 0,045 | 0,013 | 0,093    | 0,097         | 0,095 | 4,0                       | 9,03           |
| 0,781   | 0,052 | 0,016 | 0,089    | 0,091         | 0,090 | 2,1                       | 8,10           |
| 0,801   | 0,057 | 0,017 | 0,090    | 0,091         | 0,090 | 1,0                       | 8,15           |
| 0,842   | 0,060 | 0,018 | 0,094    | 0,094         | 0,094 | 0,4                       | 8,83           |

Conhecida a velocidade de atrito no fundo determinou-se a tensão de arrastamento. A tensão de arrastamento aumenta gradualmente, acompanhando o aumento da velocidade do escoamento e da velocidade de atrito no fundo. Para os ensaios realizados, obteve-se uma tensão mínima de 3,04 Pa e uma tensão máxima de 8,83 Pa (Tabela IV.6). A velocidade de atrito no fundo, para as inclinações de 0,5% e 1,0%, é uniformemente crescente (Figura

IV.14). Para a inclinação de 1,5 %, a velocidade toma valores máximos e a sua tendência, apesar de ser crescente, é pouco uniforme. Relativamente à tensão de arrastamento, confirma-se que as tensões de arrastamento geradas pelo escoamento ultrapassam o valor crítico, observando-se em todos os ensaios transporte sedimentar.



a) Velocidade de atrito no fundo do canal em função do caudal líquido escoado



b) Tensão de arrastamento em função da velocidade do escoamento

Figura IV.14 – Valores que caracterizam o escoamento



A tensão crítica do escoamento depende do material que constitui o leito, e pode ser determinada segundo formulações que derivam dos ensaios experimentais, como é demonstrado no capítulo II. Considerando a formulação de Hwang e Mehta (1989) e admitindo que a massa volúmica húmida do material é  $1,82 \text{ g/cm}^3$ , obtém-se o valor de 0,885 Pa para a tensão crítica, que comparativamente ao valor considerado por Lopes e Dias (2007), de 0,2 Pa é superior.

Os valores indicados permitem a determinação de várias taxas de erosão que podem ser comparadas entre si e com os valores obtidos nos ensaios. A obtenção das taxas de erosão pode ser feita com recurso à formulação da Tabela II.11 apresentada por Partheniades (1964) e Ariathurai (1974).

Na Figura IV.15 apresentam-se as taxas de erosão resultantes das formulações e dos ensaios para as amostras naturais e tratadas. A formulação apresentada por Hwang e Mehta (1989) para a tensão crítica levou à obtenção de taxas de erosão bastante baixas, com valor máximo de  $49 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ . Considerando a tensão crítica de Lopes e Dias (2007) obtém-se a taxa máxima de erosão é de  $235 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ . Comparando com as taxas obtidas por Hwang e Mehta (1989), verifica-se que embora as taxas sejam superiores ficam bastante longe das taxas obtidas nos ensaios. As taxas de erosão para amostras em estado natural variam entre 278 e  $1875 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ , aumentando significativamente para as taxas obtidas para as amostras tratadas.

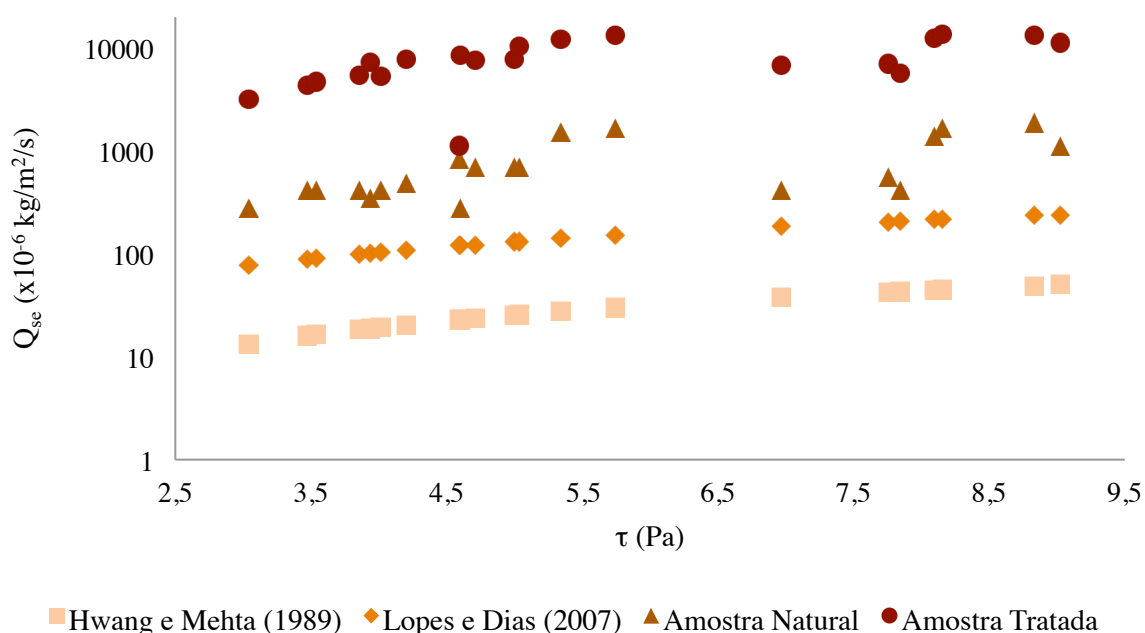


Figura IV.15 – Taxa de erosão ( $Q_{se}$ ) em função da tensão de arrastamento

Desta forma, face à diferença entre os valores das taxas de erosão obtidas através de formulações numéricas e as obtidas experimentalmente, determinaram-se valores para a tensão crítica de erosão para as amostras ensaiadas. Na Tabela IV.7 são apresentados os valores obtidos para as tensões críticas de erosão, que comparando com os valores apresentados por Hwang e Mehta (1989) e por Lopes e Dias (2007) são relativamente mais baixos. No caso dos ensaios, os valores impostos para a velocidade do escoamento conduziram a tensões superiores ao valor crítico.

Tabela IV.7 – Tensões críticas de erosão (Pa)

| i (%) | $\tau$ | Hwang e Mehta<br>(1989) | Lopes e Dias<br>(2007) | Amostras<br>Naturais | Amostras<br>Tratadas |
|-------|--------|-------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| 0,5   | 3,04   | 0,8847                  | 0,2                    | 0,059                | 0,0052               |
|       | 3,47   |                         |                        | 0,045                | 0,0044               |
|       | 3,86   |                         |                        | 0,050                | 0,0039               |
|       | 3,94   |                         |                        | 0,061                | 0,0030               |
|       | 4,21   |                         |                        | 0,047                | 0,0029               |
|       | 4,71   |                         |                        | 0,037                | 0,0034               |
|       | 5,00   |                         |                        | 0,039                | 0,0035               |
| 1,0   | 3,54   | 0,8847                  | 0,2                    | 0,046                | 0,0041               |
|       | 4,02   |                         |                        | 0,052                | 0,0041               |
|       | 4,60   |                         |                        | 0,089                | 0,0030               |
|       | 5,03   |                         |                        | 0,039                | 0,0026               |
|       | 4,60   |                         |                        | 0,030                | 0,0022               |
|       | 5,34   |                         |                        | 0,019                | 0,0024               |
|       | 5,74   |                         |                        | 0,019                | 0,0023               |
| 1,5   | 7,84   | 0,8847                  | 0,2                    | 0,101                | 0,0075               |
|       | 6,97   |                         |                        | 0,090                | 0,0056               |
|       | 7,76   |                         |                        | 0,075                | 0,0060               |
|       | 9,03   |                         |                        | 0,044                | 0,0043               |
|       | 8,10   |                         |                        | 0,032                | 0,0035               |
|       | 8,15   |                         |                        | 0,027                | 0,0033               |
|       | 8,83   |                         |                        | 0,026                | 0,0036               |



---

## **V. Considerações Finais**

---

## 1. Síntese de Resultados e Discussão

O presente subcapítulo tem como objetivo discutir os vários resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, sendo estabelecidas comparações dos valores e comportamentos e comportamentos verificados nos ensaios, com a bibliografia apresentada.

Inicialmente foi feita uma caracterização dos sedimentos, sendo avaliados alguns parâmetros, nomeadamente teor em água, peso volúmico e a análise granulométrica. De acordo com a análise granulométrica, os sedimentos estudados são do tipo areia lodosa, com um peso volúmico de  $18,2 \text{ kN/m}^3$ . Os pesos volúricos para este tipo de solo deviam situar-se entre  $16,5$  a  $20,5 \text{ kN/m}^3$  e os pesos volúricos secos entre  $12,8$  a  $17,2 \text{ kN/m}^3$  (Gomes, 1992), pelo que se confirma assim a fiabilidade da caracterização dos sedimentos.

As velocidades de escoamento utilizadas nos ensaios têm uma gama de valores que vão desde  $0,463$  a  $0,842 \text{ m/s}$ . Comparativamente com as que foram utilizadas por alguns autores em ensaios similares são superiores, El Ganaoui *et. al* (2004) utilizou velocidades mínimas na ordem dos  $0,025 \text{ m/s}$  e máximas de  $0,32 \text{ m/s}$ . A opção pela adoção de velocidades superiores, prende-se com o facto de se obterem volumes significativos, de forma a ser mais fiável a sua quantificação.

As amostras naturais e tratadas foram ensaiadas para diferentes condições hidrodinâmicas tendo-se verificado que as amostras tratadas sofreram maior erosão comparativamente às amostras naturais. A metodologia de reposição de sedimentos na secção de teste foi a que garantiu maior fiabilidade nos resultados obtidos. Os resultados dos ensaios permitiram também verificar que o aumento da velocidade, conduz a que diferença entre o comportamento das amostras naturais e tratadas diminua. A diferença dos volumes erodidos para a velocidade mínima ( $0,463 \text{ m/s}$ ) é de 11,5 vezes, enquanto que, para a velocidade máxima ( $0,842 \text{ m/s}$ ) a diferença baixa para as 7,1 vezes. A maior diferença entre as duas amostras regista-se para a velocidade de  $0,591 \text{ m/s}$  em que a diferença é de cerca de 31 vezes. O traçado dos perfis longitudinais, permitiu verificar que independentemente da amostra, a zona em que ocorre maior erosão localiza-se a montante na secção de teste.

A realização de ensaios longos, possibilitou verificar que o aumento da duração do ensaio leva a um aumento da erosão, com resultados diferentes nas duas amostras. Analisando cada tipo de amostra, concluiu-se que o volume erodido nas amostras em estado natural,

aumentou cerca de 4,6 vezes em relação ao ensaio curto. Para as amostras tratadas o aumento de volume erodido foi de cerca de 1,5 vezes. Desta forma, assinala-se que apesar do volume de erosão aumentar com o tempo, as amostras naturais sofreram um aumento maior. Constatou-se que de um modo geral, a desagregação das amostras, com a remoção do material grosseiro, levou à ocorrência de volumes maiores de erosão no tempo.

A produção de misturas assentou na ideia do estudo de Jacobs *et al.* (2011), pelo que se criaram laboratorialmente misturas com diferentes percentagens de areia, que permitiram verificar que o aumento da % de areia originou um aumento do volume de erosão. Ao contrário dos ensaios iniciais de 15 minutos, verificou-se que a zona onde ocorreu maior erosão foi a jusante na secção de teste.

Posteriormente foi feita uma análise numérica para o cálculo das tensões de arrastamento do escoamento. Para tal determinou-se inicialmente a velocidade de atrito média junto ao fundo. As tensões de arrastamento obtidas variaram entre  $8,8 \text{ N/mm}^2$  e  $30 \text{ N/mm}^2$ .

Por último foi possível comparar as taxas de erosão dos ensaios com valores da bibliografia. Verificou-se que adotando a tensão crítica de erosão apresentada na bibliografia, as taxas obtidas são extremamente baixas, quando comparadas com as taxas obtidas nos ensaios. Em relação aos ensaios com amostras naturais, as taxas de erosão são 56 vezes inferiores. Comparando com as amostras tratadas, a diferença aumenta para 445 vezes. Por outro lado, se for adotada a tensão crítica de erosão ( $0,2 \text{ N/mm}^2$ ) mencionada por Lopes e Dias (2007) para a Ria de Aveiro, as taxas de erosão resultantes aproximam-se das taxas resultantes dos ensaios. Em relação às amostras naturais a diferença é cerca de 11 vezes, enquanto que a diferença para as amostras tratadas é de 88 vezes.

## **2. Conclusões**

Pretende-se com este subcapítulo, resumir e realçar os aspetos considerados de maior importância no desenvolvimento da dissertação.

Ficou demonstrada a dificuldade inerente ao estudo dos sedimentos coesivos. A barreira do estudo prende-se com os complexos mecanismos a que estes sedimentos estão associados. Os sedimentos coesivos apresentam determinados processos (floculação, deposição, consolidação e erosão) que ocorrem de forma cíclica e que condicionam o seu comportamento.

Os ensaios laboratoriais são uma ferramenta importante na avaliação do comportamento dos sedimentos, sendo mais comum encontrar-se bibliografia descrevendo ensaios em canais tradicionais (unidirecional), podendo também aparecer referências a estudos em canais angulares.

A caracterização dos sedimentos estudados permitiu concluir que se tratava de uma areia lodosa.

Foram feitos alguns ensaios preliminares que permitiram obter, a duração ideal de 15 minutos para os ensaios curtos e concluir que a metodologia de reposição do mesmo tipo de material era a que melhor traduzia o volume de material transportado. Os ensaios visuais permitiram concluir que as singularidades presentes na amostra, ou seja existência de partículas de maiores dimensões (conchas, raízes e paus) conduzem a uma maior erosão localizada.

Os ensaios realizados com amostras naturais e tratadas permitiram concluir que de um modo geral, a desagregação das amostras, com a remoção do material grosseiro, levou à ocorrência de volumes maiores de erosão no tempo. Observou-se portanto um volume maior de erosão nas amostras tratadas comparando com as amostras naturais.

A realização dos ensaios longos, permitiu concluir que com o aumento do tempo de duração do ensaio, continua a registrar-se erosão, embora sendo menos pronunciada. As amostras quando sujeitas a ensaios mais longos tendem a estabilizar, levando deste modo a uma diminuição da taxa de erosão.

O aumento da percentagem de areia na amostra, provou que influencia de forma direta o volume de erosão na secção de teste. Concluindo, a presença de uma maior percentagem de areia na amostra conduz a um volume de erosão maior.

### **3. Desenvolvimentos Futuros**

A dissertação contempla inúmeros ensaios que contribuíram para se obter importantes conclusões, que futuramente poderão ser mais consistentes se completadas com a realização de novos trabalhos. Desta forma, considera-se pertinente a realização de mais ensaios avaliando alguns parâmetros para os quais foi verificado terem impacto nos resultados obtidos, nomeadamente a duração do ensaio (ensaio com durações entre os 15 minutos e as 8 horas). Para além disso, considera-se importante o uso de mais



equipamentos laboratoriais, nomeadamente a utilização de um *Optical Backscatter Sensor* (OBS) de forma a que seja possível monitorizar a variação dos sedimentos em suspensão. A utilização deste equipamento permitiria aferir o início da erosão baseando-se na variação da concentração de sedimentos em suspensão registada. Outra sugestão é o uso de um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) que permitiria a medição da velocidade junto ao fundo. Realizando ensaios com os dois dispositivos (OBS e ADV) permitiria avaliar a velocidade junto ao fundo do escoamento e assim quantificar a tensão crítica para a qual se verifica a mobilização dos sedimentos.

Outra questão importante prende-se com a caracterização da fração fina dos sedimentos, devendo esta ser sujeita a análise através por exemplo de ensaio de sedimentação, de forma a avaliar a percentagem de argila e silte.



### Referências Bibliográficas

Abrantes, M. I. R. R. (2005). “Os Sedimentos Superficiais da Margem Continental, Sector Espinho – Cabo Mondego: a utilização das fracções finas como traçadores de dinâmica sedimentar actual”, PhD Thesis, *Universidade de Aveiro*, 239 p.

Alves, M. A. B. (2009). “Mecanismos de Erosão e Deposição de Sedimentos”; Tese de Mestrado, *Universidade de Aveiro*, 91 p.

Araújo, M. A. V. C. (2004), “Erosion Mechanims In Marine Sediments”, PhD Tese, Universidade do Minho, 284 p.

Ariathurai, R. (1974), "A Finite Element Model for Sediment Transport in Estuaries," PhD dissertation, *Univ. of California, Davis, California*. Citado em Huang *et al.*(2006)

Arulanandan, K., Gillogley, E., and Tully, R. (1980), “Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils”, *Report GL-80-5*, U.S. Army Corps of Engineers, *Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS*.

Bardet, J.P. (1997), “Experimental Soil Mechanics. Pentice Hall, Upper Sanddle River”, *New Jersey*, 583p, ISBN:0-13-374935-5.

Borsje, B. W.; De Vries, M. B.; Hulsher, S: J. e De Boer, G.J. (2008), “Modelling large-scale cohesive sediment transport affected by small-scale biological activity”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78, 468-480.

Cancino, L., Neves, R. (1999), “Hydrodynamic and Sediment Suspension Modeling in Estuarine Systems”; *Journal of Marine Systems*, Part I: Description of the numerical models, nº 22, pp. 105-116.

Cole, P. e Miles, G. V. (1983), “Two-Dimensional Model of Mud Transport”; *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 109, nº I, pp. 1-12.

Cormault, P. (1971), “Détermination Expérimentale du Débit Solide D'érosion Fins Cohésifs”; *14e Congrès de l'A.I.R.H., Paris*. Citado em Huang *et al.*(2006)

Costa, S. e Coelho, C. (2011), “Suspended Sediment Concentration Importance on Cohesive Sediment Settling Velocity”; *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, nº 11, pp. 171-185

Delo, E.A. (1988), “The Behavior of Estuarine Muds During Tidal Cycles”, *Rep. SR 138, Hydraulic Research Station, Wallingford, UK*. Citado em Liu *et al.*(2002)

El Ganaoui, O., Schaaff, E., Boyer, P., Amielh, M., Anselmet, F. e Grenz, C. (2004). “The Deposition and Erosion of Cohesive Sediments Determined by a Multi-Class Model”; *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, nº 60, pp. 457-475.

Fernandes, L. D. F. (2001), “Transporte de Poluentes em Estuários”, Trabalho Final de Curso da Licenciatura em Engenharia do Ambiente, *Instituto Superior Técnico*, 41 p. (não editado).

Grabowski, R. C., Droppo, I. G. e Wharton, G. (2011), “Erodibility of Cohesive Sediment: The Importance of Sediment Properties”; *Earth-Science Reviews*, nº 105, pp. 101-120.

Hill, P.S., Syyski, J.P., Cowan, E.A., Powell, R.D. (1998), "In situ observations of floc settling velocities in Glacier Bay, Alaska". *Marine Geology*, 145(1-2):85-94. DOI:10.1016/S0025-3227(97)00109-6.

Hill, P.S., Milligan, T.G., Geyer, R. (2000), "Controls on effective settling velocity of suspended sediment in the Eel River flood plume". *Continental Shelf Research*, 20:2095-2111. DOI:10.1016/S0278-4343(00)00064-9.

Hwang, K. N. e Mehta, A. J. (1989), "Fine Sediment Erodibility in Lake Okeechobee"; *Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida, Report UFLICOEL-891019*, Gainesville, Florida.

Huang, J., Hildale, R. C. e Greimann, B. P. (2006), "Erosion and Sedimentation Manual"; *U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Service Center Sedimentation and River Hydraulics Group*, Denver, Colorado.

Jacobs, W., Le Hir, P., Van Kesteren, W., e Cann, P. (2011), "Erosion Threshold of Sand-Mud Mixtures"; *Continental Shelf Research*, nº 31, pp. 14-25.

Julian, J.P. & Torres, R. (2006), "Hydraulic erosion of cohesive riverbanks". *Geomorphology* 76, pp. 193-206.

Krone, R.B. (1962), "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes"; Technical Report, *Hydraulic Engineering Laboratory, University of California*, Berkeley, California.

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., (2004), "Development and validation of a three-dimensional morphological model". *Coastal Engineering* 51, 883e915. Citado em Borsje *et al.* (2008)

Liu, W.C.; Hsu, M.H. e Kuo, A.Y. (2002), “Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system”, *Taiwan. Marine Pollution Bulletin* 44 p, 1076-1088.

Lopes, J. F., e Dias, J. M. (2007), “Residual and Sediment Distribution in the Ria de Aveiro lagoon, Portugal”; *Journal of Marine Systems* nº 68, pp. 507-528.

Maggi, F. (2005), “Flocculation Dynamics of Cohesive Sediment”, PhD Thesis, *Politecnico di Torino, Itália*, 136 p.

Mehta, A. J., e Partheniades, E. (1973), “Depositional Behaviour of Cohesive Sediments”; Technical Report no. 16, *University of Florida*, Gainesville, Florida. Citado em Huang (2006).

Mitchener, H., e Torfs, H. (1996), “Erosion of Mud/Sand Mixtures”; *Coastal Engineering*, nº 29, pp. 1-25.

Nicholson, J., e O'Connor, B. A. (1986), “Cohesive Sediment Transport Model”; *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 112, nº 7, pp. 621-640.

Normant, C. (2000), “Three-dimensional modeling of cohesive sediment transporting the Loire estuary”. *Hydrological Processes* 14, 2231-2243.

Oliveira, E. M. A. (2010), “Erosão, Deposição e Transporte Sedimentar na Ria de Aveiro”; Tese de Mestrado, *Universidade de Aveiro*, 175 p.

Partheniades, E. (1965), "Erosion and Deposition of Cohesive Soils," *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE*, vol. 91, nº HYI, January, pp. 105-139. Citado em Huang *et al.*(2006)

Plus, W., Kuehl, H., Heymann, K. (1988), "Settling velocity of mudflocs: results of field measurements in the Elbe and the Wesser Estuary". In: Dronkers, J. & van Leussen, W. (eds), *Physical Processes in Estuaries*, pp.404-424, Springer, Berlim, Alemanha. ISBN:0387192662.

Portela, L.I., e Reis, M. M. (2001), "Modelação do transporte de sedimentos coesivos em ambientes estuarinos e costeiros", in Seminário sobre "A Hidroinformática em Portugal", LNEC, Lisboa, pp.10.

Quintela, A. C. (2009), "Hidráulica", 11ª edição; *Fundação Calouste Gulbenkian*, Lisboa

Ravens, T. M., e Sindelar, M. (2008), "Flume Test Section Length and Sediment Erodibility"; *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, nº 10, pp. 1503-1506.

Ribeiro, Bruno Miguel Gomes (2009). "Efeito das barragens no transporte sedimentar fluvial". *Dissertação para Mestrado em Engenharia Civil na Universidade de Aveiro*, Aveiro, p82.

Shi, Z., Zhou, H.J., Eittrein, S.L., Winterwerp, J.C. (2003), "Settling velocities of fine suspended particles in the Changjiang Estuary, China". *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(3):245-251. DOI:10.1016/S1367- 9120(03)00067-1.

Teisson, C. e Latteux, B. (1986), "A Depth-Integrated Bidimensional Model of Suspended Sediment Transport" Proceedings; *3d International Symposium On River Sedimentation*,

S.Y. Wang, H.W. Shen, and L.Z. Dings (eds.), Jackson, MS, pp. 421-429. Citado em Huang *et al.*(2006)

Ten Brinke, W.B.M. (1994), “Settling velocity of mud aggregates in the Oosterschelde tidal basin (The Netherlands), determined by a submersible video system”. *Estuarine, Coastal and Shelf Research*, 39(6):549- 564. DOI:10.1016/S0272-7714(06)80009-0.

Trento, A. E. (2005), “Dinâmica da Flocculação no Transporte de Sedimentos Finos”, *Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE*, 170 p. Citado em Alves (2009)

Van der Lee, W.T. (2000), “Temporal variation of the floc size and settling velocity in the Dollard Estuary”. *Continental Shelf Research*, 20(12-13):1495-1511. DOI:10.1016/ S0278-4343(00)00034-0.

Valeur, J.R., Pejrup, M., Jensen, A. (1996), “Particle dynamics in the Sound between Denmark and Sweden”. In: Dally, W.R. & Zeidler, R.B. (eds), *Coastal Dynamics '95, Proceedings of the International Conference on Coastal Research in Terms of Large Scale Experiments*, pp.951-962, Gdansk, Polónia, American Society of Civil Engineers (ASCE), Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 0-7844-0154-3.

van Leussen, W, Cornelisse, J.M. (1993), “The role of large aggregates in estuarine fine-sediment dynamics”. In: Metha, A.J. (eds), *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, pp.75-91, Coastal and estuarine Studies 42, American Geophysical Union (AGU), Nova York, Estados Unidos da América. ISBN: 0733-9569.

Van Rijn, L. (1993), “Principles of Sediment transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas”, *Aqua Publications*, The Netherlands. Citado em Huang *et al.*(2006)